

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

**ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН**  
**РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ**  
**И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ**  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

УТВЕРЖДЕНО  
редакционно-издательским  
советом университета,  
протокол № 1 от 10.04.08 г.

Харьков НТУ «ХПИ» 2008

**Теория механизмов и машин.** Расчетно-графические задания и методические указания по их выполнению для студентов машиностроительных специальностей/ Сост. Н. А. Ткачук, З. С. Сафонова и др. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 48 с. – Рус. яз.

Составители: Н. А. Ткачук  
З. С. Сафонова  
А. А. Зарубина  
В. И. Сериков

Рецензент Д. О. Волонцевич

Кафедра теории и систем автоматизированного проектирования  
механизмов и машин

## **ВСТУПЛЕНИЕ**

*Цель РГЗ №1 и РГЗ № 2 – закрепление и углубление теоретических знаний путем самостоятельного решения комплексной задачи исследования машины. РГЗ включают в себя структурное, кинематическое, силовое исследование главного механизма машины, кинематический анализ и синтез зубчатой передачи.*

В методических указаниях приведены задания, тематика которых основана на конкретном материале, взятом из практики заводских конструкторских бюро, то есть исходные данные для расчета приняты с учетом реальной метрики и нагрузок.

При выполнении РГЗ используются учебники и учебные пособия, указанные в списке литературы.

В методических указаниях приведены варианты заданий. Каждый вариант задания имеет шесть числовых вариантов. Номера варианта задания и числового варианта выдаются преподавателем.

Ниже приводится объем РГЗ №1 и №2.

Задания по ТММ включают в себя графическую часть (2 листа форматом А3 или А2) и пояснительную записку 10–15 с. рукописного текста (форматом А4). В графическую часть проекта включают все построения, выполненные в масштабе, а в пояснительную записку – расчеты и пояснения, связанные с выполнением заданий.

### **1. РГЗ №1 – Синтез зубчатой передачи**

#### **1.1. *Определение общего передаточного отношения зубчатой передачи***

Общее передаточное отношение зубчатой передачи [прил. Б]

$$i_{об} = \frac{\omega_d}{\omega_1},$$

где  $\omega_d$  и  $\omega_1$  – угловые скорости ротора электродвигателя и кривошипа.

Предварительно определить передаточное отношение планетарной передачи, записать выражение для передаточного отношения одноступенчатой передачи и учесть, что  $i_{об} = i_{п} \cdot i_{пл}$ , где  $i_{п}$  и  $i_{пл}$  – соответственно передаточные отношения одноступенчатой и планетарной передач.

Определить неизвестное число зубьев одного из зубчатых колес из условия обеспечения общего передаточного отношения.

Проверить выполнение условий соосности, сборки и соседства для планетарной передачи. Считать, что число блоков сателлитов равно трем ( $k = 3$ ).

### **1.2. Геометрический расчет зубчатого зацепления**

Произвести геометрический расчет зубчатого зацепления, образованного двумя зубчатыми колесами одноступенчатой передачи  $z_4$ – $z_5$ . Установить значения основных геометрических параметров зацепления по данным, приведенным в задании, считая, что указанные зубчатые колеса являются цилиндрическими эвольвентными прямозубыми, нарезанными стандартным реечным инструментом. Для зубчатых колес с числом зубьев меньше 17 коэффициент смещения рейки определить как минимальный, при котором отсутствует подрез. Для остальных зубчатых колес этот коэффициент принять равным нулю.

### **1.3. Графические построения по результатам расчета зубчатой передачи**

Построить на листе форматом А2 зубчатое зацепление  $z_4$ – $z_5$  и график изменения коэффициентов удельного скольжения в масштабе М 5:1 или М10:1.

### **1.4. Расчет коэффициента перекрытия**

Рассчитать коэффициент перекрытия по формуле

$$\varepsilon = \frac{(ab)}{P_b},$$

где  $(ab)$  – длина активной части линии зацепления;  $P_b = \pi m \cos \alpha_0$  – основной шаг.

### 1.5. Расчет коэффициентов удельного скольжения

Рассчитать коэффициенты удельного скольжения по формулам:

$$\vartheta_4 = 1 - |i_{54}| \frac{\rho_5}{\rho_4}; \quad \vartheta_5 = 1 - |i_{45}| \frac{\rho_4}{\rho_5},$$

где  $|i_{54}| = \frac{z_4}{z_5}; \quad |i_{45}| = \frac{z_5}{z_4},$

$\rho_5 = l_{N_4 N_5} - \rho_4$ ;  $\rho_4$  – расстояние от точки  $N_4$  касания линии зацепления основной окружности  $r_{b_4}$  до рассматриваемой текущей точки, отсчитываемое в направлении к точке  $N_5$  (можно использовать отрезки, на которые делили  $N_4 N_5$  для построения эвольвенты).

## 2. РГЗ №2 – Кинетостатическое исследование главного механизма

### 2.1. Структурный анализ главного механизма [прил. Б]

Построить в пояснительной записке структурную схему механизма. Выделить структурные группы, определить их класс и вид, последовательность их наложения на исходную цепь.

### 2.2. Кинематическое исследование главного механизма

Начертить на листе форматом А2 или А3 план положения механизма для заданного положения ( $\varphi_1$ ) кривошипа [прил. Г].

План положения строят в масштабе  $\mu_l$ , м/мм;  $\mu_l = l_{OA} / OA$ , где  $OA$  – длина отрезка, изображающего кривошип на плане положений.

Для заданного положения механизма построить на листе планы скоростей и ускорений. Полус плана скоростей обозначить буквой  $P$ , а полюс плана ускорений –  $\pi$ .

Планы скоростей и ускорений должны определять скорости и ускорения всех исследуемых точек: шарниров и точек на направляющих, совпадающих с шарнирными, а также центров масс звеньев, положения которых указаны в задании.

Используя построенный план скоростей и ускорений, вычислить угловые скорости и угловые ускорения звеньев.

Модули скоростей всех исследуемых точек и угловые скорости звеньев с учетом их знаков, а также модули ускорений тех же точек и угловые ускорения звеньев также с учетом их знаков привести в таблице.

### **2.3. Силовой расчет главного механизма**

Задачей силового расчета является определение реакций связей во всех кинематических парах механизма и уравновешивающей силы.

#### **2.3.1. Определение сил, действующих на звенья механизма**

Заданная сила полезного сопротивления  $P_m$  действует на выходное звено только на рабочем ходе механизма и направлена против скорости.

В заданном положении определить силы инерции и моменты пар сил инерции всех звеньев механизма.

Следует пренебречь силами тяжести, силами и моментами сил инерции тех звеньев, для которых не заданы массы. Считать, что центр масс ползуна, образующего шарнирное соединение с одним из звеньев механизма, совпадает с центром шарнира. Центры масс остальных звеньев обозначены буквой  $S$  с индексом, который соответствует номеру звена.

Силами, значения которых составляют менее 2 % от наибольшей в данном положении, пренебречь.

Все силы и моменты пар сил, используемые в силовом расчете, показать с соблюдением их направлений на кинематических схемах структурных групп, вычерченных на листе.

#### **2.3.2. Определение реакций в кинематических парах без учета сил трения**

Определить реакции в кинематических парах без учета сил трения, рассмотрев в начале структурную группу, вторую в порядке образования механизма, а затем – первую. Для построения планов сил механизма выбрать масштаб, сообразуясь с величиной наибольшей силы так, чтобы эта сила на плане представляла отрезок порядка 100–200 мм. Планы сил построить на листе. Возле планов сил проставить масштаб сил  $\mu_p, \text{Н/мм}$ . Масштабы сил для разных положений могут быть разными.

#### **2.3.3. Силовой расчет начального звена**

Произвести силовой расчет начального (входного) звена.

Начальное звено связано с выходным зубчатым колесом зубчатой передачи. К начальному звену со стороны зубчатой передачи прикладывается уравновешивающая сила  $P_y$ , направленная по одной из двух линий зацепления так, что момент, создаваемый этой силой, направлен противоположно моменту, создаваемому реакцией, приложенной к начальному звену 1 со стороны звена 2 главного

механизма.

#### **2.3.4. Проверка силового расчета**

Произвести проверку правильности силового расчета. Проверка производится после выполнения силового расчета. Условие проверки состоит в том, что мощность, создаваемая уравнивающим моментом, равна со знаком минус сумме мощностей всех активных сил, а также сил и моментов инерции, которые учитывались при силовом расчете структурных групп (реакции в этом условии не учитываются). Обозначим через  $M_y^*$  значение уравнивающего момента, найденного по условию проверки. Расчет считается правильным, если относительная погрешность вычислений, определяемая выражением

$$\delta = \left| \frac{M_{ур}^* - M_{ур}}{M_{ур}^*} \right| \cdot 100 \% ,$$

не превосходит 10 %.

### **3. Оформление пояснительной записки и чертежей**

Пояснительная записка пишется на одной стороне листа писчей бумаги формата А4 (210 х 297) в соответствии с СТ ВУЗ–ХГПУ–3.01–2000 «Система стандартов по организации учебного процесса. Текстовые документы в сфере учебного процесса. Общие требования к выполнению» и излагается без формулировок теорем и определений. Расстояние между строками должно быть 8–12 мм. Страницы пояснительной записки должны иметь поля: левое (для сшивания) – не менее 30 мм, правое – не менее 10 мм, верхнее – 15 мм, нижнее – 20 мм. Нумерация страниц сквозная: первой страницей (номер не ставится) является титульный лист, второй – содержание и так далее. Номера страниц проставляются арабскими цифрами в правом верхнем углу. Список использованной литературы и приложения включаются в сквозную нумерацию.

Уравнения и формулы записываются в общем виде, затем в них подставляются числовые значения и приводится конечный результат. Единицы размерностей величин указываются только с конечным результатом.

Все расчеты должны быть выполнены с использованием международной системы единиц СИ.

Содержание пояснительной записки рекомендуется разбивать на разделы и подразделы, обозначаемые арабскими цифрами. Их нумерация

должна соответствовать нумерации данных методических указаний.

Материал в пояснительной записке располагается в такой последовательности: титульный лист, содержание, основная часть, список использованной литературы, приложения.

Графическая часть заданий состоит из двух листов форматом А3 (А2) (прил. В, Г).

Каждый лист оформляется в соответствии с требованием СТП – ХПИ – 21–86 «Конструкторские документы. Форматы. Основные надписи».

### **Список литературы**

1. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин: учеб. для ВТУЗов – М.: Наука, 1988. – 640 с.

2. Теория механизмов и машин: учеб. для ВТУЗов/ Фролов К. В., Попов С. А. и др.; под ред. Фролова К. В. – М.: Высш. шк., 1987. – 496 с.

3. Курсовое проектирование по теории механизмов и машин. Коренько А. С. и др. – К.: Вища шк., 1970. – 332 с.

4. Методические указания к самостоятельной работе по проектированию и исследованию шарнирно-рычажных механизмов по дисциплине "Теория механизмов и машин" для студентов машиностроительных специальностей дневного и вечернего обучения / А. А. Грунауэр, И. Д. Долгих – Харьков: ХПИ, 1992. – 145 с.

5. Грунауэр А. А. , Долгих И. Д. Теория механизмов и машин. Системный подход: учеб. пособие / – К.: УМК ВО, 1992. – 384 с.

6. Теория механизмов и машин. Методические указания к выполнению курсового проекта по курсу теории механизмов и машин (с применением ЭВМ) для студентов машиностроительных специальностей / Составители

Н. А. Ткачук, Г. А. Кротенко, А. А. Зарубина и др. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – 44 с.

7. Теория механизмов и машин. Методические указания к выполнению раздела курсового проекта «Построение картины эвольвентного зубчатого зацепления графическим и графоаналитическим методами» для студентов машиностроительных специальностей/ Составители Н. А. Ткачук, А. А. Зарубина, З. С. Сафонова и др. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 28 с.

8. Таблица значений эвольвентной функции в зависимости от величины угла давления. – М.: Издание МВТУ, 1959. – 20 с.



## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А

#### Задания на РГЗ №1 и №2

Ниже приведены задания. В каждом задании даны: кинематическая схема главного механизма, схема зубчатой передачи. Главный механизм представляет собой плоский шестизвенный механизм. Входным (ведущим звеном) является кривошип 1, а выходным (ведомым) – ползун 5. На ползуне 5 крепится инструмент. Рабочим является ход ползуна вниз или справа налево.

Входное звено главного механизма получает движение от асинхронного электродвигателя через зубчатую передачу, которая представляет собой последовательно соединенные планетарный механизм и одноступенчатую передачу с зубчатыми колесами  $z_4$  и  $z_5$ .

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ В ЗАДАНИЯХ

$l_{OA}, l_{BC}, l_{BD} \dots$  – длины звеньев 1, 2, 3 и т.д. рычажного механизма, м;

$x_B, y_B, x_C \dots$  – координаты осей шарниров B, C, м;

$l_{BS_2}, l_{AS_3}, \dots$  – длины отрезков, определяющих положение центров масс звеньев  $S_2, S_3 \dots$ , м;

$H_D, H_C, \dots$  – ход ползуна 5, м;

$n_d$  – частота вращения двигателя, об/мин;

$n_1$  – частота вращения начального звена – кривошипа, об/мин;

$P_m$  – модуль максимальной силы полезного сопротивления, действующей на выходное звено на рабочем ходу, кН;

$m_2, m_3, m_4 \dots$  – массы звеньев, кг;

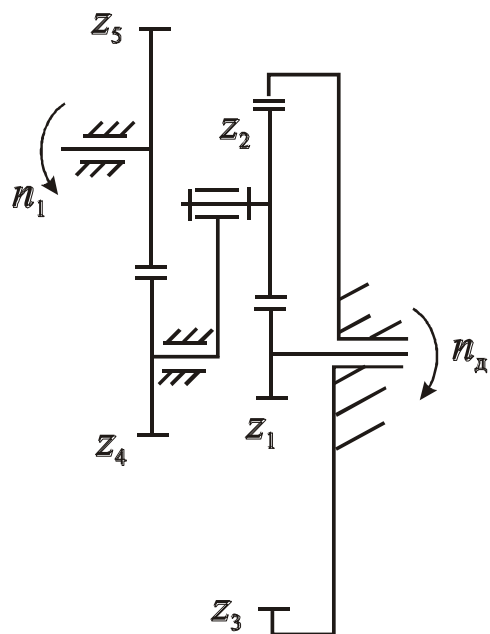
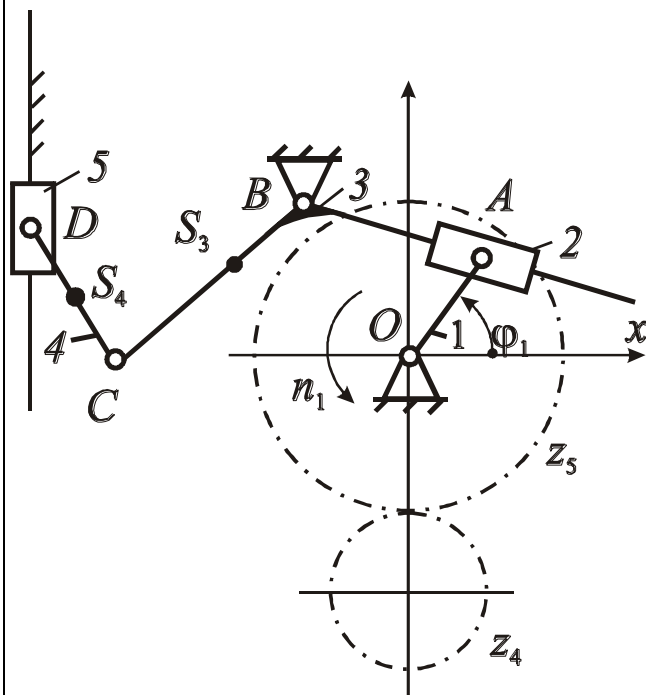
$I_{S_2}, I_{S_3}, I_{S_4} \dots$  – моменты инерции звеньев относительно осей, перпендикулярных плоскости чертежа и проходящих через центры масс звеньев  $S_2, S_3, S_4$  кг·м<sup>2</sup>;

$z_1, z_2, z_3$  – числа зубьев зубчатых колес;

$H$  – водило в зубчатом редукторе;

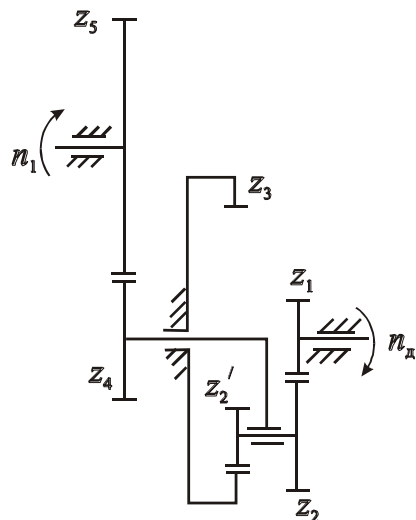
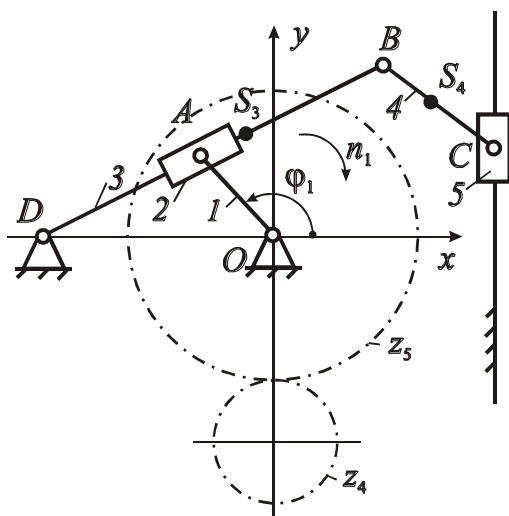
$m$  – модуль зубьев колес цилиндрической зубчатой передачи, мм;

### Задание 1. Долбежный станок



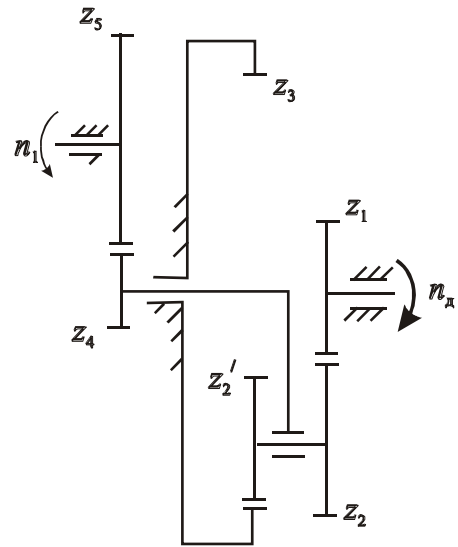
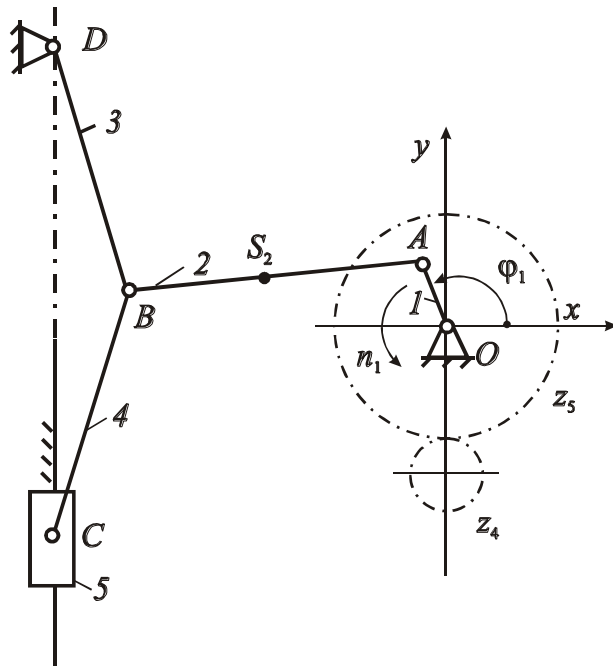
Параметр	Ед. изм.	Варианты числовых значений						Параметр	Ед. изм.	Варианты числовых значений					
		1	2	3	4	5	6			1	2	3	4	5	6
$n_d$	об/мин	1450	1460	1430	1455	1455	1470	$m_4$	кг	4	4	4	4	4	4
$n_1$	об/мин	130	140	120	140	125	150	$m_5$	кг	80	120	200	150	150	160
$l_{AO}$	м	0.073	0.054	0.062	0.065	0.057	0.049	$I_{S_2}$	кг·м <sup>2</sup>	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
$l_{BC}$	м	0.24	0.23	0.225	0.24	0.235	0.225	$I_{S_3}$	кг·м <sup>2</sup>	0.025	0.035	0.003	0.0032	0.003	0.003
$l_{CD}$	м	0.132	0.128	0.15	0.13	0.14	0.125	$I_{S_4}$	кг·м <sup>2</sup>	0.004	0.003	0.004	0.004	0.002	0.002
$l_{CS_3}$	м	0.08	0.08	0.075	0.08	0.075	0.075	$P_m$	кН	10.7	10.5	20.5	12.0	20.0	18.0
$l_{CS_4}$	м	0.066	0.064	0.075	0.065	0.07	0.062	$z_1$	-	24	17	28	24	18	20
$x_B$	м	-0.134	-0.13	-0.176	-0.131	-0.132	-0.125	$z_2$	-	36	25	35	30	27	25
$y_B$	м	0.092	0.096	0.098	0.10	0.091	0.096	$z_3$	-	96	67	98	84	72	70
$\angle ABC$	град	130	125	135	140	120	135	$z_4$	-	9	11	8	10	9	10
$m_2$	кг	4	4	4	4	4	4	$m$	мм	4	4	4	4	4	4
$m_3$	кг	30	40	35	40	35	35	$x_D$	м	-0.38	-0.38	-0.43	-0.40	-0.36	-0.38

## Задание 2. Брикетировочный автомат



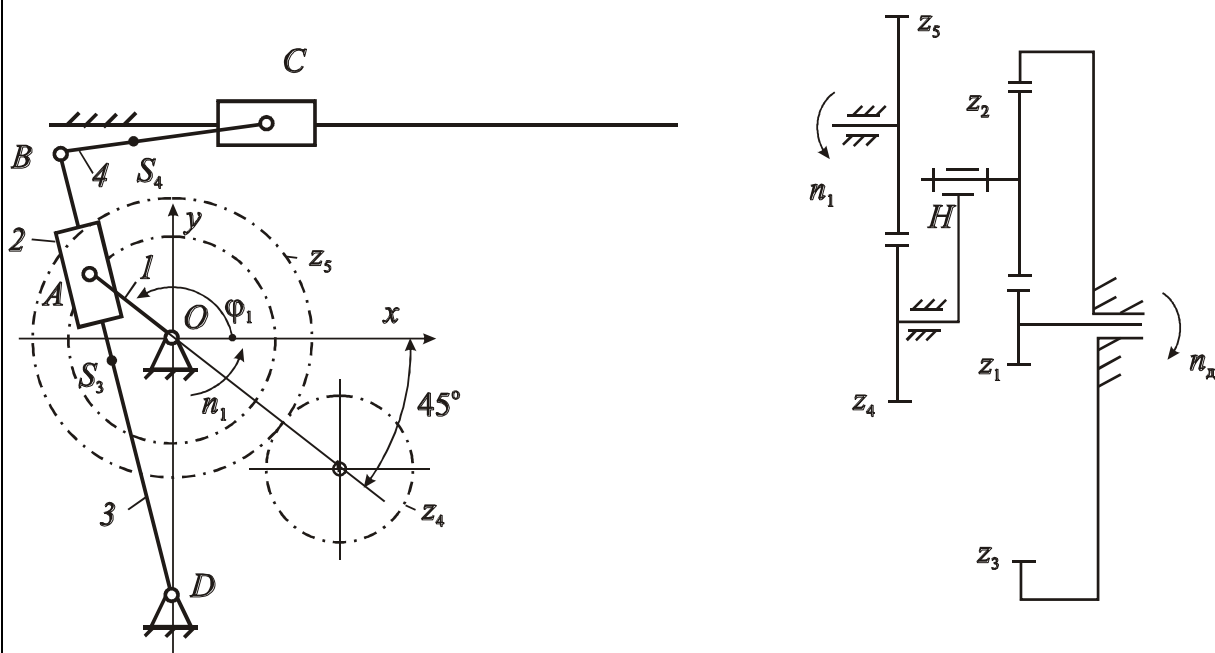
Параметр	Ед. изм.	Варианты числовых значений						Параметр	Ед. изм.	Варианты числовых значений					
		1	2	3	4	5	6			1	2	3	4	5	6
$n_d$	об/мин	2870	2870	2870	2870	2870	2870	$m_4$	кг	5	4	4	5	5	4
$n_1$	об/мин	170	220	160	170	185	215	$m_5$	кг	50	45	45	55	45	45
$l_{OA}$	м	0.075	0.10	0.11	0.13	0.10	0.05	$I_{S_2}$	кг·м <sup>2</sup>	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
$l_{BD}$	м	0.375	0.440	0.52	0.56	0.45	0.37	$I_{S_3}$	кг·м <sup>2</sup>	0.04	0.038	0.04	0.042	0.04	0.04
$l_{BC}$	м	0.15	0.175	0.20	0.19	0.17	0.18	$I_{S_4}$	кг·м <sup>2</sup>	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
$l_{BS_3}$	м	0.20	0.22	0.26	0.28	0.225	0.185	$P_m$	кН	10.7	10.5	20.5	12.0	20.0	18.0
$l_{BS_4}$	м	0.075	0.10	0.10	0.095	0.085	0.090	$z_1$	-	42	24	18	18	33	18
$y_D$	м	0	0	0	0	0	0	$z_2$	-	83	50	57	58	66	36
$x_D$	м	-0.19	-0.25	-0.25	-0.3	-0.22	-0.16	$z_2'$	-	25	25	25	29	25	27
$x_C$	м	0.18	0.21	0.21	0.23	0.20	0.20	$z_3$	-	150	99	100	105	124	81
$m_2$	кг	4	4	4	4	4	4	$z_4$	-	13	12	13	13	12	9
$m_3$	кг	30	26	28	30	25	26	$m$	мм	5	5	5	5	5	5

### Задание 3. Вырубной пресс



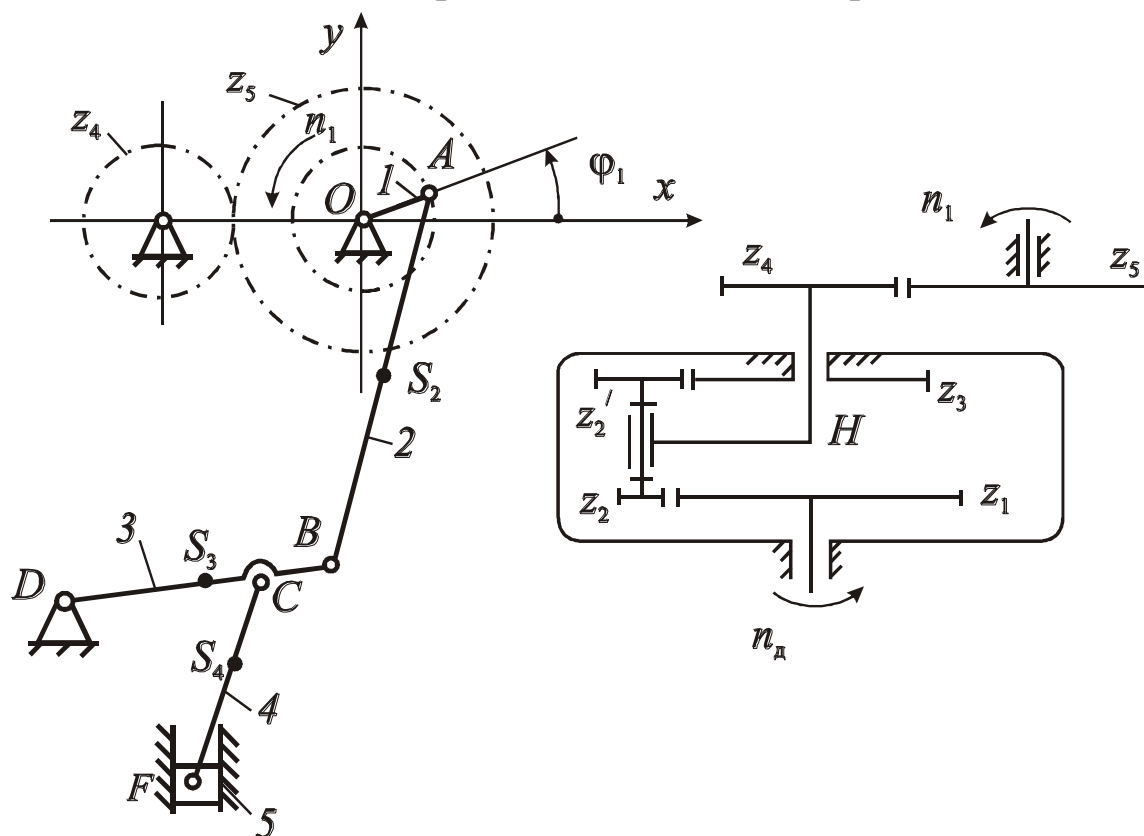
Параметр	Ед. изм.	Варианты числовых значений						Параметр	Ед. изм.	Варианты числовых значений					
		1	2	3	4	5	6			1	2	3	4	5	6
$n_d$	об/мин	1450	1450	1450	1450	1450	1450	$m_3$	кг	35	32	35	36	38	38
$n_1$	об/мин	64	63	61	65	61	60	$m_4$	кг	35	32	36	35	38	40
$l_{OA}$	м	0.037	0.037	0.044	0.046	0.049	0.050	$m_5$	кг	40	35	40	42	42	45
$l_{AB}$	м	0.190	0.178	0.171	0.188	0.157	0.178	$I_{S_2}$	кг·м <sup>2</sup>	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
$l_{BD}$	м	0.17	0.165	0.175	0.18	0.185	0.19	$I_{S_3}$	кг·м <sup>2</sup>	0.005	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005
$l_{BC}$	м	0.17	0.165	0.175	0.18	0.185	0.19	$I_{S_4}$	кг·м <sup>2</sup>	0.005	0.004	0.005	0.006	0.006	0.006
$x_D$	м	-0.25	-0.24	-0.235	-0.25	-0.22	-0.24	$P_m$	кН	7	8	7	8	7	8
$y_D$	м	0.172	0.146	0.161	0.149	0.155	0.172	$z_1$	-	23	18	18	23	20	21
$x_C$	м	-0.25	-0.24	-0.235	-0.25	-0.22	-0.24	$z_2$	-	52	48	48	52	61	50
$l_{AS_2}$	м	0.063	0.05	0.05	0.06	0.04	0.05	$z_2'$	-	21	21	21	21	31	22
$l_{DS_3}$	м	0.085	0.083	0.088	0.09	0.0925	0.095	$z_3$	-	96	87	87	96	112	93
$l_{BS_4}$	м	0.085	0.083	0.088	0.09	0.0925	0.095	$z_4$	-	11	12	13	13	13	12
$m_2$	кг	20	18	20	22	25	25	$m$	мм	5	5	5	5	5	5

## Задание 4. Поперечно-строгальный станок



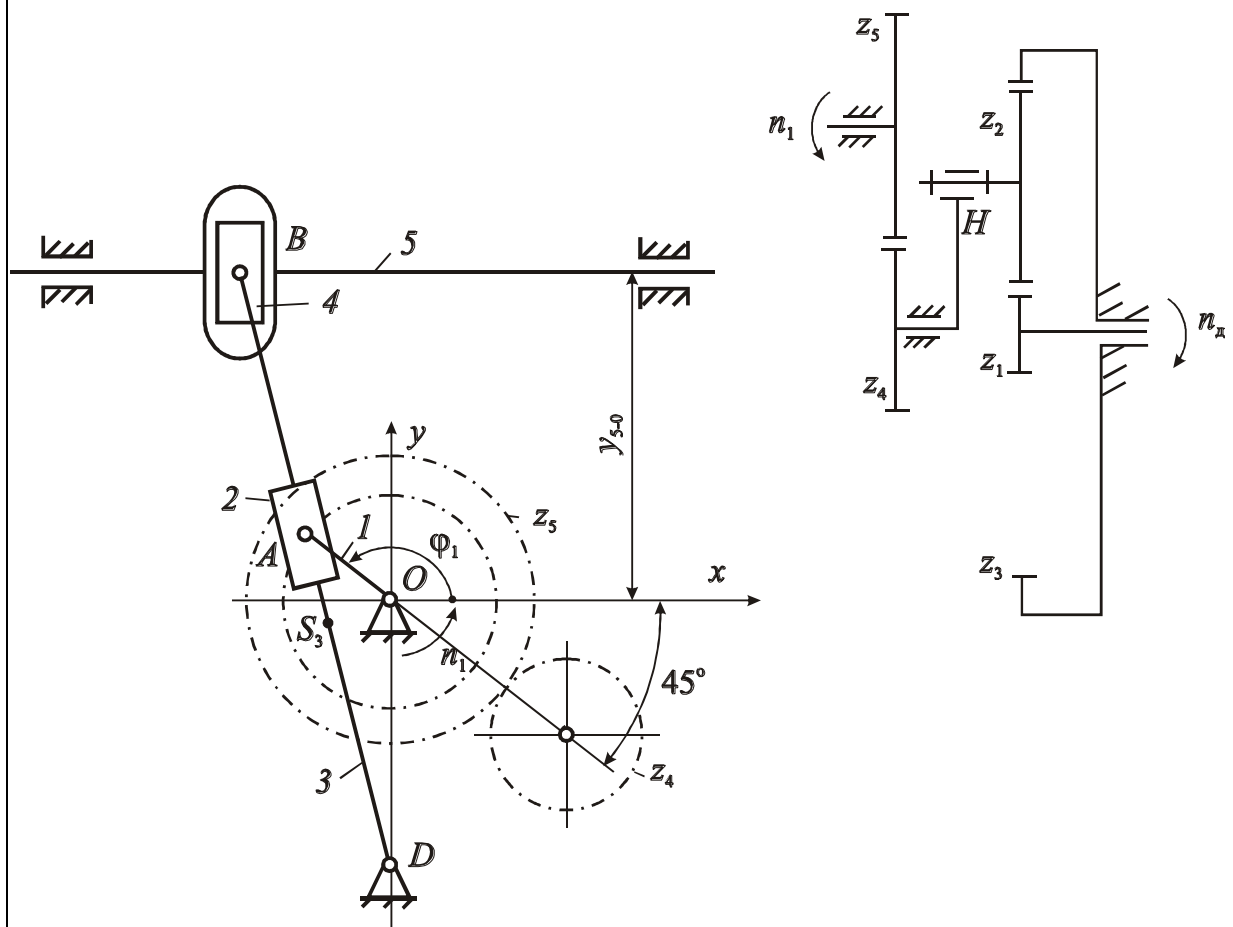
Параметр	Ед. изм.	Варианты числовых значений						Параметр	Ед. изм.	Варианты числовых значений					
		1	2	3	4	5	6			1	2	3	4	5	6
$n_d$	об/мин	980	980	980	980	980	980	$m_4$	кг	4	4	4	4	4	3
$n_1$	об/мин	80	90	75	70	85	80	$m_5$	кг	170	190	200	220	180	150
$l_{AO}$	м	0.082	0.113	0.065	0.1	0.078	0.049	$I_{S_2}$	кг·м <sup>2</sup>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
$l_{DB}$	м	0.376	0.45	0.52	0.56	0.45	0.37	$I_{S_3}$	кг·м <sup>2</sup>	0.29	0.38	0.61	0.48	0.42	0.34
$l_{BC}$	м	0.125	0.15	0.17	0.18	0.15	0.125	$I_{S_4}$	кг·м <sup>2</sup>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$l_{DS_3}$	м	0.188	0.225	0.26	0.28	0.225	0.185	$P_m$	кН	12	14	13	11	14	12
$l_{BS_4}$	м	0.06	0.07	0.08	0.09	0.075	0.06	$z_1$	-	24	30	18	19	17	24
$x_D$	м	0	0	0	0	0	0	$z_2$	-	36	45	27	29	25	36
$y_D$	м	-0.19	-0.25	-0.25	-0.3	-0.22	-0.16	$z_3$	-	96	120	72	77	67	96
$y_C$	м	0.17	0.18	0.26	0.24	0.22	0.20	$z_4$	-	9	11	8	9	9	9
$m_2$	кг	4	4.5	5.0	3.5	2.0	2.0	$m$	мм	5	5	5	5	5	5
$m_3$	кг	25	35	40	40	25	30								

### Задание 5. Пресс для изделий из порошка



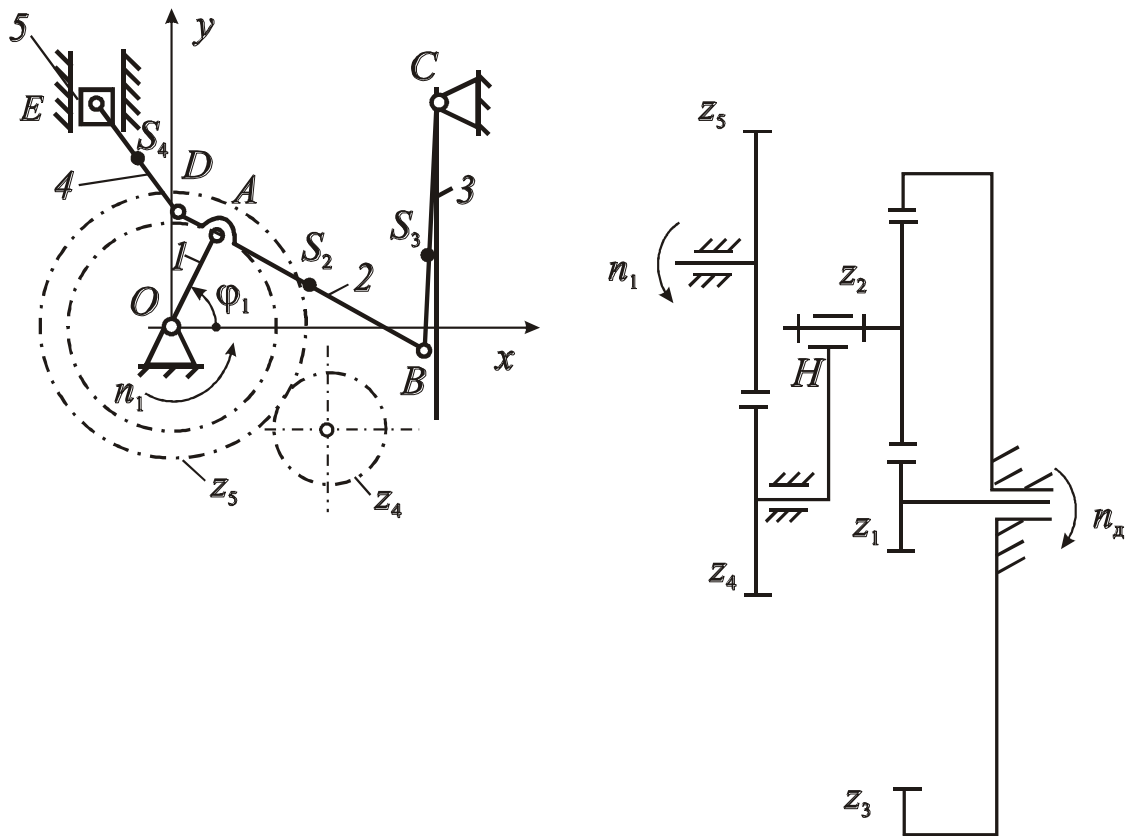
Параметр	Ед. изм.	Варианты числовых значений						Параметр	Ед. изм.	Варианты числовых значений					
		1	2	3	4	5	6			1	2	3	4	5	6
$n_d$	об/мин	2750	2840	2750	2850	2850	2840	$m_3$	кг	3.9	7.0	3.5	18.5	16.0	8.0
$n_1$	об/мин	203	214	200	206	240	236	$m_4$	кг	1.5	4.0	3.0	6.0	7.0	3.5
$l_{AO}$	м	0.058	0.108	0.050	0.235	0.145	0.104	$m_5$	кг	10	12	10	20	20	12
$l_{AB}$	м	0.202	0.410	0.204	0.820	0.851	0.403	$I_{S_2}$	кг·м <sup>2</sup>	0.10	0.10	0.09	0.81	0.88	0.09
$l_{BD}$	м	0.23	0.432	0.215	0.902	0.944	0.440	$I_{S_3}$	кг·м <sup>2</sup>	0.20	0.14	0.12	1.80	1.44	0.18
$l_{CD}$	м	0.175	0.32	0.180	0.60	0.720	0.310	$I_{S_4}$	кг·м <sup>2</sup>	0.02	0.04	0.02	0.14	0.20	0.03
$l_{CF}$	м	0.125	0.30	0.160	0.48	0.55	0.28	$P_m$	кН	4	4	3	4	4	2
$x_F$	м	-0.06	-0.16	-0.080	-0.32	-0.34	-0.19	$z_1$	-	87	31	37	55	23	41
$x_D$	м	-0.240	-0.48	-0.25	-0.95	-1.06	-0.54	$z_2$	-	78	74	98	110	97	59
$y_D$	м	-0.20	-0.38	-0.20	-0.80	-0.82	-0.36	$z_{2'}$	-	17	25	34	27	41	17
$l_{AS_2}$	м	0.101	0.205	0.102	0.410	0.426	0.202	$z_3$	-	148	80	101	138	79	83
$l_{BS_3}$	м	0.115	0.216	0.108	0.451	0.472	0.22	$z_4$	-	10	11	9	12	12	10
$l_{CS_4}$	м	0.062	0.150	0.08	0.24	0.275	0.14	$m$	мм	5	5	5	5	5	5
$m_2$	кг	5.0	6.0	5.8	12.0	12.5	5.8								

## Задание 6. Металлорежущий станок



Пара-метр	Ед. изм.	Варианты числовых значений						Пара-метр	Ед. изм.	Варианты числовых значений					
		1	2	3	4	5	6			1	2	3	4	5	6
$n_d$	об/мин	980	980	980	980	980	980	$m_4$	кг	4	4.5	4.5	5	4	5
$n_1$	об/мин	85	90	70	75	90	80	$m_5$	кг	200	210	270	220	240	250
$l_{AO}$	м	0.083	0.096	0.088	0.1	0.1	0.1	$I_{S_2}$	кг·м <sup>2</sup>	0.002	0.0018	0.002	0.002	0.002	0.002
$l_{DB}$	м	0.566	0.564	0.647	0.559	0.705	0.677	$I_{S_3}$	кг·м <sup>2</sup>	0.09	0.096	0.125	0.10	0.17	0.09
$l_{DS_3}$	м	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	$P_m$	кН	5.5	6.0	7.0	6.0	5.0	7.0
$x_D$	м	0	0	0	0	0	0	$z_1$	-	17	24	19	18	30	23
$y_D$	м	-0.27	-0.27	-0.285	-0.285	-0.29	-0.29	$z_2$	-	25	36	29	27	45	34
$y_{5-0}$	м	0.28	0.28	0.34	0.26	0.40	0.37	$z_3$	-	67	96	77	72	120	91
$m_2$	кг	4	4.5	5.0	5.0	4.5	5.0	$z_4$	-	9	9	9	8	11	9
$m_3$	кг	35	40	60	50	80	50	$m$	мм	5	4	5	5	4	5

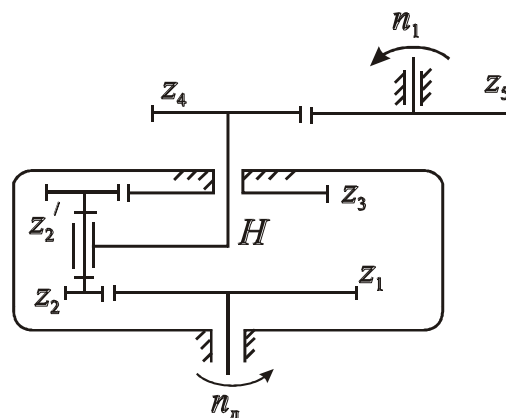
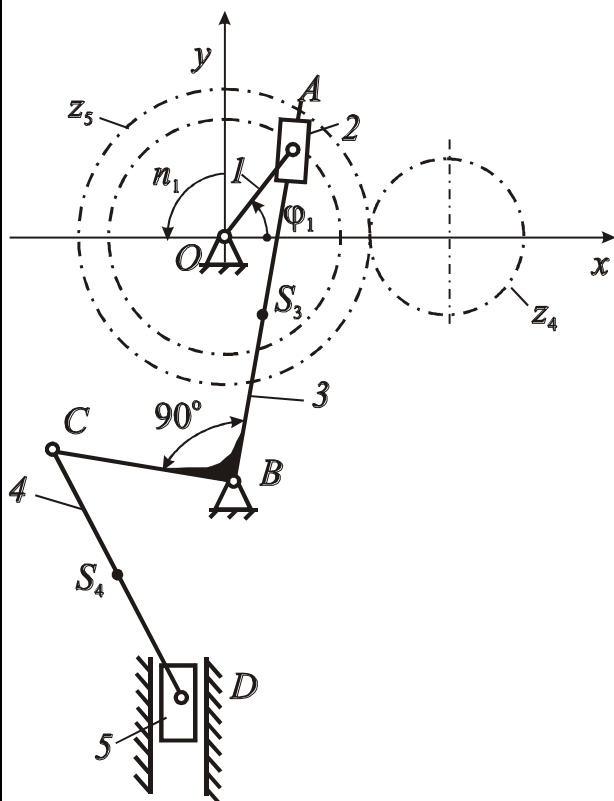
## Задание 7. Механический пресс



Параметр	Ед. изм.	Варианты числовых значений						Параметр	Ед. изм.	Варианты числовых значений					
		1	2	3	4	5	6			1	2	3	4	5	6
$n_d$	об/мин	1470	1480	1480	1470	1480	1480	$m_2$	кг	40	45	42	42	43	44
$n_1$	об/мин	128	123	132	135	130	123	$m_3$	кг	42	48	45	46	45	45
$l_{AO}$	м	0.25	0.30	0.26	0.26	0.27	0.29	$m_4$	кг	48	52	50	54	52	50
$l_{BC}$	м	0.82	1.00	0.90	0.95	0.95	0.98	$m_5$		68	75	70	80	82	80
$l_{AB}$	м	0.65	0.86	0.73	0.95	0.80	0.82	$I_{S_2}$	кг·м <sup>2</sup>	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
$l_{AD}$	м	0.15	0.17	0.23	0.28	0.31	0.29	$I_{S_3}$	кг·м <sup>2</sup>	2.3	2.5	2.4	2.4	2.4	2.5
$l_{DE}$	м	0.702	0.544	0.506	0.708	0.625	0.572	$I_{S_4}$	кг·м <sup>2</sup>	2.9	3.1	3.2	3.1	3.2	3.1
$x_C$	м	0.60	0.92	0.90	0.92	0.88	0.86	$P_m$	кН	117	130	143	104	125	135
$y_C$	м	0.80	0.94	0.80	0.86	0.88	0.86	$z_1$	-	19	18	28	21	22	20
$x_E$	м	-0.20	-0.22	-0.28	-0.40	-0.35	-0.35	$z_2$	-	29	36	50	36	53	67
$l_{BS_2}$	м	0.40	0.51	0.48	0.55	0.56	0.56	$z_3$	-	77	90	128	93	128	154
$l_{BS_3}$	м	0.41	0.50	0.45	0.48	0.48	0.49	$z_4$	-	11	10	10	10	12	12
$l_{DS4}$	м	0.35	0.28	0.25	0.36	0.31	0.29	$m$	мм	5	5	5	5	5	5
$m_1$	кг	29	32	30	30	31	32								



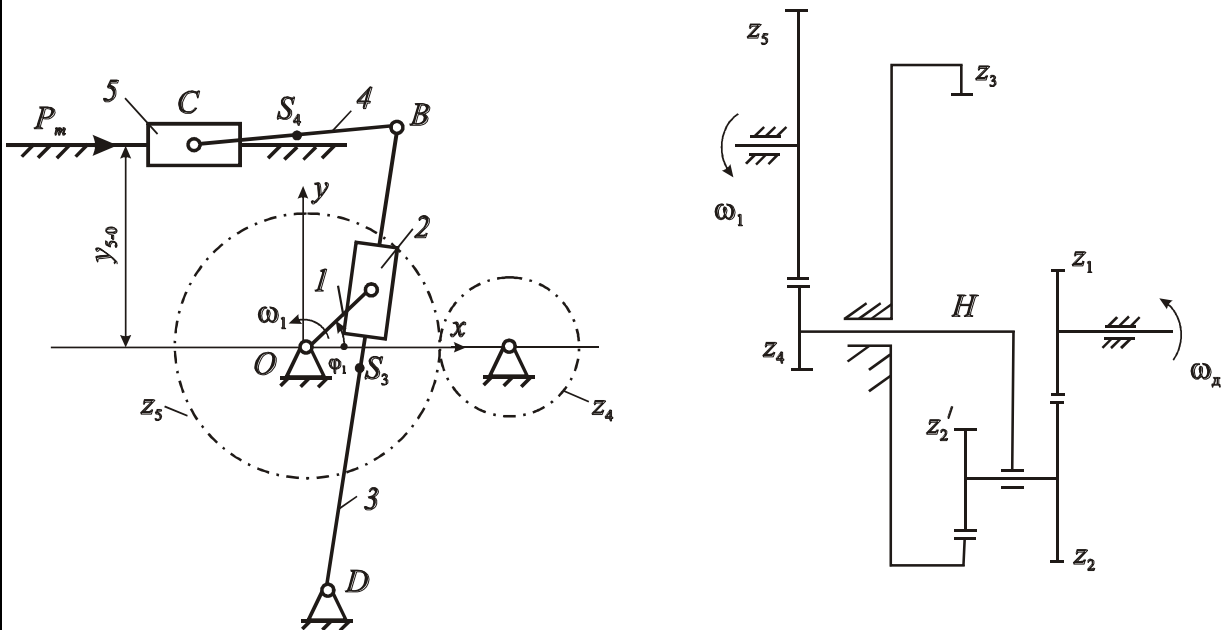
### Задание 8. Поршневой насос



Параметр	Ед. изм.	Варианты числовых значений						Параметр	Ед. изм.	Варианты числовых значений					
		1	2	3	4	5	6			1	2	3	4	5	6
$n_d$	об/мин	1450	1450	1450	1450	1450	1450	$m_4$	кг	15	12	17	11	10	9
$n_1$	об/мин	101	117	147	97	138	145	$m_5$	кг	60	52	65	50	48	45
$l_{AO}$	м	0.06	0.05	0.07	0.06	0.045	0.045	$I_{S_2}$	кг·м <sup>2</sup>	0.005	0.004	0.006	0.004	0.003	0.003
$l_{BC}$	м	0.108	0.100	0.128	0.09	0.104	0.087	$I_{S_3}$	кг·м <sup>2</sup>	0.010	0.017	0.018	0.018	0.012	0.012
$l_{CD}$	м	0.180	0.20	0.225	0.235	0.210	0.19	$I_{S_4}$	кг·м <sup>2</sup>	0.020	0.018	0.025	0.017	0.015	0.014
$l_{BS_3}$	м	0.10	0.08	0.11	0.09	0.06	0.05	$P_m$	кН	18.2	16.5	18.7	16.0	14.3	13.8
$l_{CS_4}$	м	0.09	0.10	0.11	0.12	0.11	0.09	$z_1$	-	87	31	37	55	23	41
$x_D$	м	-0.05	-0.05	-0.08	-0.05	0.04	-0.05	$z_2$	-	78	74	98	110	97	59
$x_B$	м	0	0	0	0	0	0	$z_2'$	-	17	25	34	27	41	17
$y_B$	м	-0.13	-0.12	-0.15	-0.12	-0.09	-0.084	$z_3$	-	148	80	101	138	79	83
$m_2$	кг	5	4	6	4	3.5	3.5	$z_4$	-	13	14	15	12	12	12
$m_3$	кг	12	10	15	9	8	7.5	$m$	мм	5	5	5	5	5	5

Пример выполнения РГЗ №1 и №2

Задание 10, вариант 1. Поперечно-строгальный станок



Параметр	Единица измерения	Числовое значение	Параметр	Единица измерения	Числовое значение
$n_d$	об/мин	980	$m_5$	кг	150
$n_1$	об/мин	80	$I_{S_2}$	кг · м <sup>2</sup>	0,02
$l_{AO}$	м	0,08	$I_{S_3}$	кг · м <sup>2</sup>	0,3
$l_{DB}$	м	0,36	$I_{S_4}$	кг · м <sup>2</sup>	0,02
$l_{BC}$	м	0,12	$P_m$	кН	5
$l_{DS_3}$	м	0,18	$z_1$	-	24
$l_{BS_4}$	м	0,06	$z_2$	-	36
$x_D$	м	0	$z_2'$		30
$y_D$	м	-0,2	$z_3$	-	90
$y_{5-0}$	м	0,16	$z_4$	-	10
$m_2$	кг	4	$m$	мм	5
$m_3$	кг	25	$\varphi_1$	град	45
$m_4$	кг	4			

РГЗ №1

## Синтез зубчатой передачи

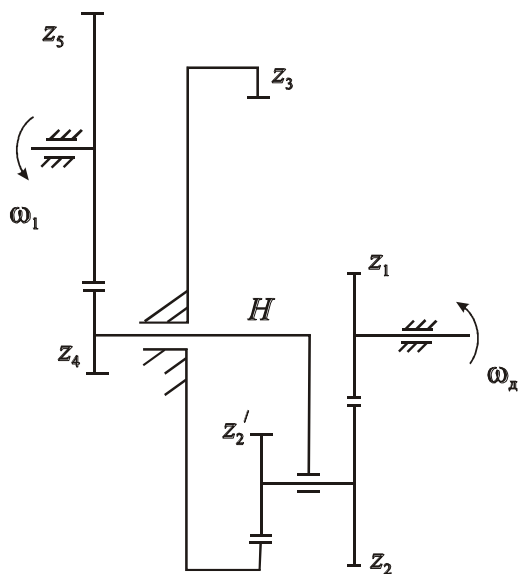


Рисунок 1 – Кинематическая схема зубчатого механизма

Кинематическая схема зубчатого механизма приведена на рис. 1.

$$z_1 = 24; z_2 = 36; z_{2'} = 30; z_3 = 90; z_4 = 10;$$

$$m = 5 \text{ mm}$$

1. Определение общего передаточного отношения зубчатой передачи

Общее передаточное отношение от двигателя к начальному звену  $l$ :

$$i_{d1} = \frac{\omega_d}{\omega_1} = \frac{102,57}{8,37} = 12,25,$$

где  $\omega_d = \frac{\pi \cdot n_d}{30} = \frac{\pi \cdot 980}{30} = 102,57 \text{ с}^{-1}$ ;

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{\pi \cdot 80}{30} = 8,37 \text{ c}^{-1}.$$

В общем виде представим передаточное отношение  $i_{д1}$ , как произведение передаточных отношений планетарного механизма  $z_1 - z_2 - z_{2'} - H(i_{1H})$  и зубчатой передачи  $z_4 - z_5$  ( $i_{45}$ ):

$$|i_{d1}| = |i_{1H}| \cdot |i_{45}|, \quad (1)$$

$$\text{где } i_{1H} = 1 - i_{13}^{(H)} = 1 - \left[ \left( -\frac{z_2}{z_1} \right) \cdot \frac{z_3}{z_{2'}} \right] = 1 + \frac{z_2 \cdot z_3}{z_1 \cdot z_{2'}} = 1 + \frac{36 \cdot 90}{24 \cdot 30} = 5,5;$$

$$i_{45} = \frac{\omega_4}{\omega_5} = -\frac{z_5}{z_4} = -\frac{z_5}{10}.$$

Подставим полученные значения в формулу (1)

$$12,25 = 5,5 \cdot \frac{z_5}{10},$$

откуда

$$z_5 = \frac{12,25 \cdot 10}{5,5} = 22,27.$$

Принимаем  $z_5 = 22$  (округляем до целого).

Проверим условия существования планетарного механизма:

- **условие соосности**

$$m(z_1 + z_2) = m(z_3 - z_{2'})$$

$$5(24 + 36) = 5(90 - 30)$$

$$300 = 300 - \text{выполняется};$$

Продолжение прил. Б

- условие соседства

$$(z_1 + z_2) \sin \frac{\pi}{k} > z_{2'} + 2h_a^*,$$

где  $k$  – число блоков сателлитов (принимается  $k = 3$ );  $h_a^* = 1$  – коэффициент высоты головки зуба (ГОСТ)

$$60 \cdot \sin 60^\circ > 30 + 2;$$

$$51,96 > 32 \text{ – выполняется;}$$

- условие сборки

$$\frac{z_1 \cdot z_{2'} + z_3 \cdot z_2}{k \cdot L} = Q,$$

где  $L$  – наибольший общий делитель чисел зубьев  $z_2 = 36$ ;  $z_{2'} = 30$ ;  $L = 6$ ;  $Q$  – любое целое число;

$$\frac{36 \cdot 30 + 24 \cdot 30}{3 \cdot 6} = 220 \text{ – выполняется.}$$

## 2. Геометрический расчет зубчатого зацепления

Определим геометрические параметры зубчатого зацепления, состоящего из зубчатых колес  $z_4 = 10$ ;  $z_5 = 22$ ;  $m = 5$  мм.

Считаем, что зубчатые колеса – прямозубые, эвольвентные, цилиндрические, нарезанные стандартным реечным инструментом, для которого:  $h_a^* = 1$  – коэффициент высоты головки зуба,  $c^* = 0,25$  – коэффициент радиального зазора;  $\alpha_0 = 20^\circ$  – угол профиля.

Определяем:

- коэффициенты смещения реечного инструмента из условия устранения подреза:

для колеса  $z_4 = 10$

$$x_4 = h_a^* \left( 1 - \frac{z_4}{z_{\min}} \right) = 1 \cdot \left( 1 - \frac{10}{17} \right) = 0,4117;$$

для колеса  $z_5 = 22$ ,  $x_5 = 0$ , так как  $z_5 > (z_{\min} = 17)$ ,  $h_a^* = 1$ ;

- угол эксплуатационного зацепления  $\alpha_w$ :

$$\text{inv } \alpha_w = \text{inv } \alpha_0 + 2 \frac{x_4 + x_5}{z_4 + z_5} \text{tg } \alpha_0 = \text{inv } 20^\circ + 2 \frac{0,4117 + 0}{10 + 22} \text{tg } 20^\circ = 0,02427$$

по значению  $\text{inv } \alpha_w = 0,02427$  найдем угол  $\alpha_w = 23^\circ 25'$  (таблица инволют ( $\text{inv } \alpha$ ) приведена в прил. Б);

Продолжение прил. Б

- коэффициент воспринимаемого смещения:

$$y = \frac{z_4 + z_5}{2} \left( \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_w} - 1 \right) = \frac{10 + 22}{2} \left( \frac{0,939}{0,917} - 1 \right) = 0,384;$$

- коэффициент уравнительного смещения:

$$\Delta y = x_4 + x_5 - y = 0,412 + 0 - 0,384 = 0,028;$$

- радиальный зазор:

$$c = c^* m = 0,25 \cdot 5 = 1,25 \text{ мм},$$

( $c^* = 0,25$  - коэффициент радиального зазора);

- межосевое расстояние:

$$a_w = m \frac{z_4 + z_5}{2} \cdot \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_w} = 5 \frac{10 + 22}{2} \cdot \frac{0,939}{0,917} = 81,92 \text{ мм};$$

- радиусы делительных окружностей:

$$r_4 = \frac{m z_4}{2} = \frac{5 \cdot 10}{2} = 25 \text{ мм},$$

$$r_5 = \frac{m z_5}{2} = \frac{5 \cdot 22}{2} = 55 \text{ мм};$$

- радиусы основных окружностей:

$$r_{b_4} = \frac{m z_4}{2} \cos \alpha_0 = \frac{5 \cdot 10}{2} \cos 20^\circ = \frac{5 \cdot 10}{2} \cdot 0,939 = 23,475 \text{ мм},$$

$$r_{b_5} = \frac{m z_5}{2} \cos \alpha_0 = \frac{5 \cdot 22}{2} \cos 20^\circ = \frac{5 \cdot 22}{2} \cdot 0,939 = 51,645 \text{ мм};$$

- радиусы начальных окружностей:

$$r_{w_4} = \frac{m z_4}{2} \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_w} = \frac{5 \cdot 10}{2} \cdot \frac{0,939}{0,917} = 25,6 \text{ мм},$$

$$r_{w_5} = \frac{m z_5}{2} \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_w} = \frac{5 \cdot 22}{2} \cdot \frac{0,939}{0,917} = 56,32 \text{ мм},$$

(проверка:  $a_w = r_{w_4} + r_{w_5}$ ;  $81,92 = 25,6 + 56,32 = 81,92$  мм);

- радиусы окружностей вершин:

$$r_{a_4} = m \left( \frac{z_4}{2} + h_a^* + x_4 - \Delta y \right) = 5 \left( \frac{10}{2} + 1 + 0,412 - 0,028 \right) = 31,92 \text{ мм},$$

$$r_{a_5} = m \left( \frac{z_5}{2} + h_a^* + x_5 - \Delta y \right) = 5 \left( \frac{22}{2} + 1 + 0 - 0,028 \right) = 59,86 \text{ мм};$$

- радиусы окружностей впадин:

Продолжение прил. Б

$$r_{f_4} = m \left( \frac{z_4}{2} + x_4 - h_a^* - c^* \right) = 5 \left( \frac{10}{2} + 0,412 - 1 - 0,25 \right) = 20,81 \text{ мм},$$

$$r_{f_5} = m \left( \frac{z_5}{2} + x_5 - h_a^* - c^* \right) = 5 \left( \frac{22}{2} + 0 - 1 - 0,25 \right) = 48,75 \text{ мм};$$

$$(\text{проверка: } r_{a_4} + r_{f_5} + c = r_{a_5} + r_{f_4} + c = a_w;$$

$$31,92 + 48,75 + 1,25 = 59,86 + 20,81 + 1,25 = 81,92);$$

- толшины зубьев по делительным окружностям:

$$S_4 = \frac{\pi m}{2} + 2x_4 m \operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{\pi 5}{2} + 2 \cdot 0,412 \cdot 5 \cdot \operatorname{tg} 20^\circ = 9,35 \text{ мм},$$

$$S_5 = \frac{\pi m}{2} + 2x_5 m \operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{\pi 5}{2} + 0 = 7,85 \text{ мм};$$

- шаг зацепления по делительной окружности:

$$P = \pi m = \pi \cdot 5 = 15,70 \text{ мм}.$$

### 3. Графические построения по результатам расчета зубчатой передачи

На листе формата А2 в масштабе М 10:1 или М 5:1 строим картину зубчатого зацепления в соответствии с методикой, изложенной в [7].

#### 4. Расчет коэффициента перекрытия $\varepsilon$

На построенной картине зубчатого зацепления находим активную часть линии зацепления ( $ab$ ), которая определяется пересечением окружностей вершин ( $r_{a_4}$  и  $r_{a_5}$ ) с теоретической линией зацепления  $N_4 N_5$ . Истинную длину ( $\overline{ab}$ ) делим на основной шаг и получаем коэффициент перекрытия:

$$\varepsilon = \frac{(\overline{ab})}{\pi m \cos \alpha_0} = \frac{18}{\pi \cdot 5 \cdot \cos 20^\circ} = \frac{18}{14,74} = 1,22.$$

#### 5. Расчет коэффициентов удельного скольжения

Так как рабочие участки профилей зубьев перекатываются друг по другу со скольжением, то на этих участках возникают силы трения, что приводит к изнашиванию профилей. Характеристикой вредного влияния скольжения являются коэффициенты  $\vartheta_4$  и  $\vartheta_5$  удельного скольжения, которые можно рассчитать по формулам:

$$\vartheta_4 = 1 - \left| i_{54} \right| \frac{\rho_5}{\rho_4};$$

$$\vartheta_5 = 1 - |i_{45}| \frac{\rho_4}{\rho_5},$$

где

$$|i_{54}| = \frac{z_4}{z_5} = \frac{10}{22} = 0,45, \quad |i_{45}| = \frac{z_5}{z_4} = \frac{22}{10} = 2,2, \quad \rho_5 = l_{N_4 N_5} - \rho_4,$$

$l_{N_4 N_5}$  – длина теоретической части линии зацепления с основной окружностью  $r_{b_4}$ , отсчитываемая в направлении к точке  $N_5$  (можно использовать отрезки, на которые делили  $N_4 N_5$  для построения эвольвенты).

Результаты расчета  $\vartheta_4$  и  $\vartheta_5$  приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов удельного скольжения

$\rho_4$	0	25	50	75	100 (p)	138	176	214	252	290	328
$\vartheta_4$	$-\infty$	-4,8	-2,7	-0,53	0	0,4	0,51	0,69	0,90	0,98	1,0
$\vartheta_5$	1	0,83	0,56	0,47	0	-0,79	-1,54	-2,27	-3,86	-6,81	$-\infty$

График функций  $\vartheta_4$  и  $\vartheta_5$  построен на листе 1 в масштабе  $\mu_g = 0,1$  1/мм.

## РГЗ №2

### Кинетостатическое исследование главного механизма

#### 1. Структурный анализ главного механизма

Главный механизм станка состоит из пяти подвижных звеньев. Подвижное соединение звеньев осуществляется кинематическими парами пятого класса.

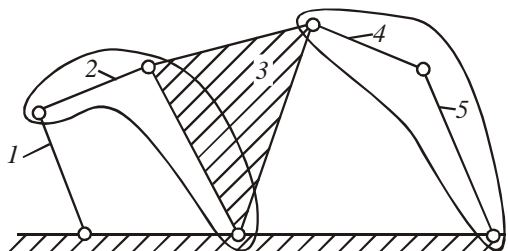


Рисунок 2 – Структурная схема механизма

Структурная схема механизма представлена на рис. 2.

Для проведения кинематического и силового расчета механизма выделим структурные группы. В порядке присоединения к ведущему звену 1 это будут следующие группы:

• звенья 2-3 - 1-я в порядке присоединения структурная группа (рис. 3, а), 2-ой класс, 2-ой порядок;

- звенья 4-5 - 2-я в порядке присоединения структурная группа (рис. 3, б), 2-ой класс, 2-ой порядок.

Продолжение прил. Б

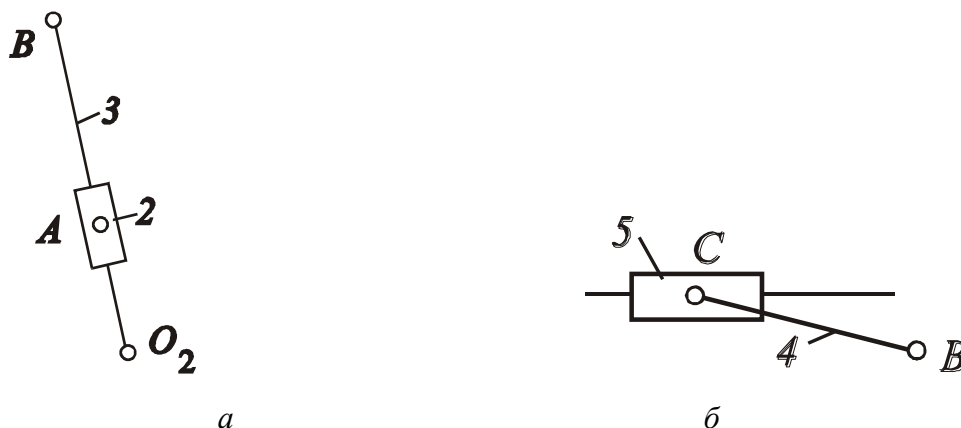


Рисунок 3 – Кинематические схемы групп Ассура: а – группа 2-3; б – группа 4-5

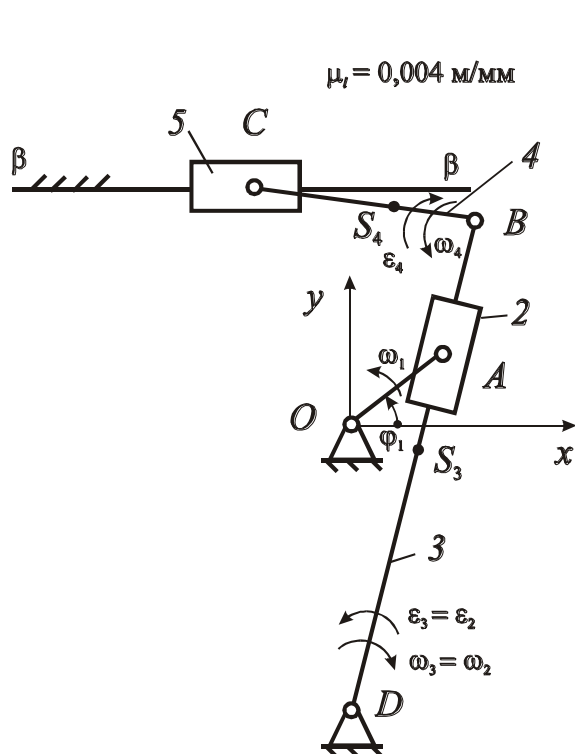
## 2. Кинематическое исследование главного механизма

Цель кинематического исследования – определить координаты, скорости и ускорения осей шарниров и центров масс звеньев, углы поворота, угловые скорости и ускорения звеньев для заданного положения начального звена.

### 2.1. Построение плана положения механизма

Для построения плана положения механизма выбираем масштаб длин  $\mu_l = 0,004 \text{ м/мм}$ . Вычисляем длины отрезков, изображающих звенья на чертеже:

$$|OA| = \frac{l_{OA}}{\mu_l} = \frac{0,08}{0,004} = 20 \text{ мм}; \quad |y_D| = \frac{Y_D}{\mu_l} = \frac{-0,02}{0,004} = -50 \text{ мм};$$



$$|y_{5-0}| = \frac{Y_{5-0}}{\mu_l} = \frac{0,16}{0,004} = 40 \text{ мм};$$

$$|BC| = \frac{l_{BC}}{\mu_l} = \frac{0,12}{0,004} = 30 \text{ мм};$$

$$|DS_3| = \frac{l_{DS_3}}{\mu_l} = \frac{0,18}{0,004} = 45 \text{ мм};$$

$$|BS_4| = \frac{l_{BS_4}}{\mu_l} = \frac{0,06}{0,004} = 15 \text{ мм}.$$

На листе А2 вычертим план положения механизма для заданного положения кривошипа ( $\phi_1 = 45^\circ$ ) (рис. 4).

Построение проводим следующим образом: из начала координат

Рисунок 4 – План положения механизма



Продолжение прил. Б

0 строим точку  $D$  ( $y_D = -50$  мм;  $x_D = 0$ ) и отмечаем положение направляющей  $\beta - \beta$  для ползуна 5 ( $y_{5-0} = 40$  мм), затем строим положение кривошипа, для этого под углом  $\varphi_1 = 45^\circ$  проводим отрезок  $|OA| = 20$  мм; точку  $A$  соединяем с точкой  $D$ . От точки  $D$  отложим  $|DB| = 90$  мм. Из полученной точки  $B$  размером  $|BC| = 30$  мм делаем засечку на направляющей  $\beta - \beta$ , на пересечении получим точку  $C$ . Соединив точку  $C$  с точкой  $B$  получим положение звена 4.

## 2.2. Определение скоростей

### 2.2.1. Определение линейных скоростей шарнирных точек механизма.

Записываем уравнения скоростей по группам Ассура, начиная с группы 2-3.

Рассмотрим структурную группу 2-3. Общая точка –  $A$ . Точки присоединения: звено 2 присоединяется в точке  $A_{1,2}$ , звено 3 – в точке  $D$ . Для звена 2 используем вторую теорему механики, которая свяжет скорость точки  $A_3$  на направляющей и точки  $A_2$  на ползуне (точка присоединения). Для звена 3 используем первую теорему механики, которая свяжет точку  $A_3$  с точкой  $D$  (точка присоединения, скорость которой известна  $V_D = 0$ ).

$$\begin{cases} \vec{V}_{A_3} = \vec{V}_{A_2} + \vec{V}_{3-2}; \\ \vec{V}_{A_3} = \vec{V}_D + \vec{V}_{A_3D}. \end{cases}$$

В уравнениях:

$$V_{A_2} = \omega_1 l_{OA} = 8,37 \cdot 0,08 = 0,67 \text{ м/с},$$

где  $\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{\pi \cdot 80}{30} = 8,37 \text{ с}^{-1}$ ; вектор  $\vec{V}_{A_2}$  направлен  $\perp OA$  в направлении

$\omega_1$ ;  $\vec{V}_{3-2} \parallel AD$ , величина неизвестна;  $V_D = 0$ ;  $\vec{V}_{A_3D} \perp AD$ , величина неизвестна.

Строим план скоростей. Для этого определим масштабный коэффициент

$$\mu_V = \frac{V_{A_2}}{(pa_2)} = \frac{0,67}{33,5} = 0,02 \frac{\text{м}}{\text{с} \cdot \text{мм}},$$

где  $(pa_2) = 33,5$  мм – отрезок плана скоростей, изображающий вектор  $V_{A_2}$ . Из полюса  $p$  (рис. 5) проводим  $(pa_2) = 33,5$  мм, из точки  $a_2$  линию  $\parallel AD$ . Затем строим вектора второго уравнения:  $V_D = 0$ , точка  $d$  в полюсе ( $p$ ), из полюса проводим направление  $\vec{V}_{A_3D} \perp AD$  до пересечения с направлением  $\parallel AD$ ; на

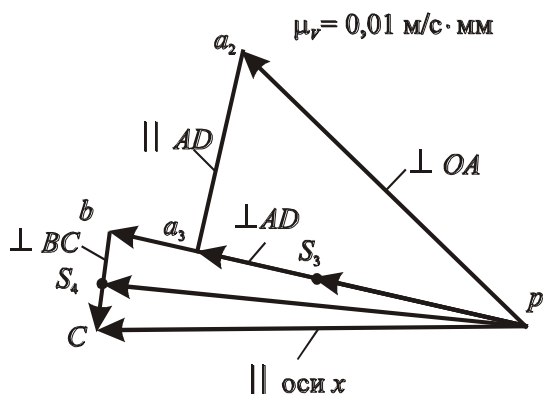


Рисунок 5 – План скоростей

пересечении получим точку  $a_3$ ;  
 $V_{A_3} = (pa_3) \cdot \mu_v = 27 \cdot 0,02 = 0,54$  м/с.

Рассмотрим группу Ассура 4-5. Точки присоединения группы 4-5: точка  $B_3(B_4)$ , скорость которой определим по теореме подобия из соотношения:

$$(pb) = (pa_3) \frac{|BD|}{|AD|} = 27 \cdot \frac{90}{67} = 36 \text{ мм}; \text{ а}$$

также точка  $C_0$ , скорость которой  $V_{C_0} = 0$ , так как точка принадлежит стойке. Неизвестной является скорость точки  $C_4(C_5)$ . Запишем систему векторных уравнений, воспользовавшись первой и второй теоремой.

$$\begin{cases} \vec{V}_{C_4} = \vec{V}_B + \vec{V}_{CB}; \\ \vec{V}_{C_5} = \vec{V}_{C_0} + \vec{V}_{5-0}, \end{cases}$$

где  $V_B = (pb) \cdot \mu_v = 36 \cdot 0,02 = 0,72$  м/с, на плане скоростей откладываем из полюса отрезок  $(pb) = 36$  мм; вектор  $\vec{V}_{CB} \perp CB$  по величине неизвестен; проводим из точки  $b$  линию  $\perp CB$ ;  $\vec{V}_{C_0} = 0$ , точка  $C_0$  в полюсе, из полюса проводим линию  $\parallel$  направлению вектора  $\vec{V}_{5-0}$  ( $\parallel \beta - \beta$ ), пересечение ее с линией  $\perp CB$  определяет точку  $C$ . Скорость  $V_{C_4} = V_{C_5} = (pc) \cdot \mu_v = 38 \cdot 0,02 = 0,76$  м/с.

Из плана скоростей имеем:

относительные скорости  $V_{3-2} = (a_2a_3) \cdot \mu_v = 19 \cdot 0,02 = 0,38$  м/с;

$V_{A_3D} = (pa_3) \cdot \mu_v = 27 \cdot 0,02 = 0,54$  м/с;  $V_{CB} = (cb) \cdot \mu_v = 8,5 \cdot 0,02 = 0,17$  м/с;

где  $(a_2a_3)$ ,  $(pa_3)$ ,  $(cb)$  – отрезки из плана скоростей, мм.

Для определения скорости центров масс звеньев механизма воспользуемся теоремой подобия и найдем на плане точки  $s_3$  и  $s_4$  из таких соотношений:

$$\frac{(pb)}{(ps_3)} = \frac{|BD|}{|DS_3|} \rightarrow (ps_3) = (pb) \frac{|DS_3|}{|DB|} = 36 \frac{45}{90} = 18 \text{ мм};$$

$$V_{S_3} = (ps_3) \cdot \mu_v = 18 \cdot 0,02 = 0,36 \text{ м/с};$$

$$\frac{(bc)}{(bs_4)} = \frac{|BC|}{|BS_4|} \rightarrow (bs_4) = (bc) \frac{|BS_4|}{|BC|} = 8,5 \frac{15}{30} = 4,25 \text{ м/с};$$

на отрезке  $(bc)$  строим точку  $s_4$ , соединяем ее с полюсом  $p$  и получаем  $V_{S_4} = (ps_4) \cdot \mu_v = 37 \cdot 0,02 = 0,74$  м/с.

Продолжение прил. Б

### 2.2.2. Определение угловых скоростей звеньев.

Угловая скорость звеньев 2 и 3 одинакова, так как они образуют поступательную пару.

$$\omega_3 = \omega_2 = \frac{V_{A_3D}}{l_{AD}} = \frac{0,54}{|AD| \cdot \mu_l} = \frac{0,54}{67 \cdot 0,004} = 2,01 \text{ с}^{-1}.$$

где  $|AD| = 67$  мм – из плана механизма.

$$\text{Угловая скорость звена 4 } \omega_4 = \frac{V_{CB}}{l_{CB}} = \frac{0,17}{0,12} = 1,4 \text{ с}^{-1}.$$

Покажем направления угловых скоростей звеньев 3 и 4. Для этого вектор относительной скорости  $V_{A_3D}$  мысленно перенесем из плана скоростей на звено 3 в точку  $A$  и посмотрим куда повернет этот вектор звено относительно неподвижной точки  $D$ ; также поступим и с определением направления  $\omega_4$ : вектор  $V_{CB}$  мысленно перенесем в точку  $C$  и посмотрим, куда этот вектор повернет звено 4 относительно мысленно неподвижной точки  $B$ . Направления  $\omega$  показаны на схеме механизма. Величины, полученных из плана скоростей, занесем в табл. 2.

Таблица 2 – Значения величин скоростей

$V_C$ , м/с	$V_{A_3D}$ , м/с	$V_{CB}$ , м/с	$V_{S_3}$ , м/с	$V_{S_4}$ , м/с	$\omega_3 = \omega_2$ , с <sup>-1</sup>	$\omega_4$ , с <sup>-1</sup>
0,76	0,54	0,17	0,36	0,74	2,01	1,4

### 2.3. Определение ускорений

#### 2.3.1. Определение линейных ускорений точек механизма.

Запишем векторные уравнения ускорений:

- группа 2-3:

$$\begin{cases} \vec{a}_{A_3} = \vec{a}_{A_2} + \vec{a}_{3-2}^{kop} + \vec{a}_{3-2}^{omh}; \\ \vec{a}_{A_3} = \vec{a}_D + \vec{a}_{A_3D}^n + \vec{a}_{A_3D}^{\tau}, \end{cases}$$

- группа 4-5:

$$\begin{cases} \vec{a}_{C_4} = \vec{a}_B + \vec{a}_{CB}^n + \vec{a}_{CB}^{\tau}; \\ \vec{a}_{C_5} = \vec{a}_{C_0} + \vec{a}_{5-0}^{kop} + \vec{a}_{5-0}^{omh}. \end{cases}$$

Ускорение точки  $A$  кривошипа:

$$a_{A_2} = \omega_1^2 \cdot l_{OA} = (8,37)^2 \cdot 0,08 = 5,6 \text{ м/с}^2.$$

Так как векторные уравнения ускорений решаем графически, то есть

Продолжение прил. Б

построением планов ускорений, выбираем масштабный коэффициент планов ускорений

$$\mu_a = \frac{a_{A_2}}{\pi a_2} = \frac{5,6}{56} = 0,01 \frac{\text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{мм}},$$

где  $\pi a_2 = 56$  мм – отрезок плана ускорений, изображающий ускорение  $a_{A_2}$ .

Точка  $\pi$  – полюс плана ускорений.

Строим план ускорений. Из полюса ( $\pi$ ) (рис. 6) проводим отрезок  $\pi a_2 = 56$  мм параллельно звену  $OA$  от точки  $A$  к точке  $O$ , затем откладываем отрезок

$$(a_2 k) = \frac{a_{3-2}^{\text{кор}}}{\mu_a} = \frac{1,54}{0,1} = 15,4 \text{ мм, где}$$

$$a_{3-2}^{\text{кор}} = 2V_{3-2}\omega_2 = 2 \cdot 0,38 \cdot 2,01 = 1,54 \text{ м/с}^2.$$

Направление вектора  $a_{3-2}^{\text{кор}}$  определяем поворотом вектора относительной скорости  $V_{3-2}$  на  $90^\circ$  в направлении  $\omega_2$ . Из полученной точки  $k$  проводим направление относительного ускорения  $a_{3-2}^{\text{отн}} \parallel AD$ .

Строим второе векторное уравнение:  $a_D = 0$ , точка  $d$  в полюсе, из полюса проводим

$$(\pi n_1) = \frac{a_{A_3D}^n}{\mu_a} = \frac{1,07}{0,1} = 10,7 \text{ мм, где}$$

$$a_{A_3D}^n = \omega_3^2 l_{AD} = 2,01^2 \cdot 67 \cdot 0,004 = 1,07 \text{ м/с}^2.$$

Направление  $a_{A_3D}^n \parallel AD$  от  $A$  к  $D$ . Из точки  $n_1$  ведем линию  $\perp AD$  – это направление вектора  $a_{A_3D}^{\tau}$ ; пересечение этой линии с направлением  $\parallel AD$  определяет точку  $a_3$ , соединив которую с полюсом  $\pi$  получим:  $a_{A_3} = (\pi a_3) \mu_a = 20 \cdot 0,1 = 2 \text{ м/с}^2$ .

Для определения ускорения  $a_{C_4} = a_{C_5}$  необходимо найти ускорение

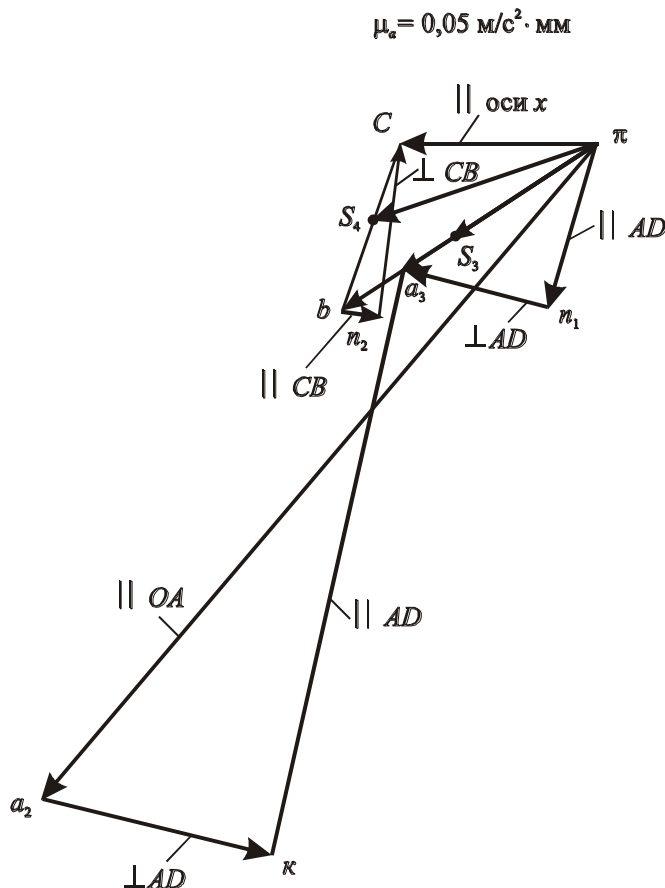


Рисунок 6 – План ускорений

Продолжение прил. Б

точки  $B$  по теореме подобия:  $(\pi b) = (\pi a_3) \frac{|BD|}{|AD|} = 20 \frac{90}{67} = 26,8$  мм, строим

точку  $b$  и из нее проводим отрезок  $(\pi n_2) = \frac{a_{CB}^n}{\mu_a} = \frac{0,24}{0,1} = 2,4$  мм, где

$a_{CB}^n = \omega_4^2 l_{CB} = 1,4^2 \cdot 0,12 = 0,24$  м/с<sup>2</sup>. Вектор  $\vec{a}_{CB}^n$  направлен  $\parallel CB$  от  $C$  к  $B$ . Из

точки  $n_2$  ведем линию  $\perp CB$  – это направление вектора  $a_{CB}^\tau$ . Затем строим

второе векторное уравнение:  $a_{C_0} = 0$ ;  $a_{5-0}^{kop} = 2V_{5-0}\omega_0 = 0$ , поэтому из полюса

$\pi$  проведем линию  $\parallel \beta - \beta$  до пересечения с линией  $\perp CB$ , на пересечении

получим точку  $c$ . Из плана ускорений имеем:  $a_{C_4} = a_{C_5} = (\pi c)\mu_a = 21 \cdot 0,1 = 2,1$  м/с<sup>2</sup>;

$a_{A_3D}^\tau = (n_1 a_3)\mu_a = 21 \cdot 0,1 = 2,1$  м/с<sup>2</sup>;  $a_{CB}^\tau = (n_2 c)\mu_a = 11 \cdot 0,1 = 1,1$  м/с<sup>2</sup>.

Ускорение центров масс определяем по подобию:

$(\pi s_3) = (\pi b) \frac{|DS_3|}{|DB|} = 26,8 \frac{45}{90} = 13,4$  мм;  $a_{S_3} = (\pi s_3)\mu_a = 13,4 \cdot 0,1 = 1,34$  м/с<sup>2</sup>;

$a_{S_4} = (\pi s_4)\mu_a = 24 \cdot 0,1 = 2,4$  м/с<sup>2</sup>.

2.3.2. Определение угловых ускорений звеньев.

$\varepsilon_3 = \varepsilon_2 = \frac{a_{A_3D}^\tau}{l_{AD}} = \frac{2,1}{67 \cdot 0,004} = 7,83$  с<sup>-2</sup>;  $\varepsilon_4 = \frac{a_{CB}^\tau}{l_{CB}} = \frac{1,1}{0,12} = 9,17$  с<sup>-2</sup>.

Направление угловых ускорений определяем по методике, положенной в п. 2.2.2.2, только используем вектора тангенциальных ускорений  $a_{A_3D}^\tau$  и  $a_{CB}^\tau$ .

Значения всех ускорений сведены в табл. 3.

Таблица 3 – Значения величин ускорений

$a_C$ , м/с <sup>2</sup>	$a_{AD}^\tau$ , м/с <sup>2</sup>	$a_{CB}^\tau$ , м/с <sup>2</sup>	$a_{S_3}$ , м/с <sup>2</sup>	$a_{S_4}$ , м/с <sup>2</sup>	$\varepsilon_3 = \varepsilon_2$ , с <sup>-2</sup>	$\varepsilon_4$ , с <sup>-2</sup>
2,1	2,1	1,1	1,34	2,4	7,83	9,17

### 3. Силовой расчет главного механизма

#### 3.1. Определение сил, действующих на звенья механизма

Определяем силы тяжести, силы инерции и моменты пар сил инерции звеньев механизма:

- силы тяжести

$$G_2 = m_2 g = 4 \cdot 9,81 = 39,24 \text{ Н};$$

$$G_4 = m_4 g = 4 \cdot 9,81 = 39,24 \text{ Н};$$

$$G_3 = m_3 g = 25 \cdot 9,81 = 245 \text{ Н};$$

$$G_5 = m_5 g = 150 \cdot 9,81 = 1470 \text{ Н};$$

- сила производственного сопротивления  $P_{\text{пс}} = P_m = 5000$  Н;
- силы инерции

Продолжение прил. Б

$$\vec{P}_{и_2} = m_2 a_{A_2} = 4 \cdot 5,6 = 22,4 \text{ Н};$$

вектор  $\vec{P}_{и_2}$  направлен против  $\vec{a}_{A_2}$  и приложен в центре масс звена 2 в точке  $A_2$ ;  $\vec{P}_{и_3} = m_3 a_{S_3} = 25 \cdot 1,34 = 33,5 \text{ Н}$ , вектор  $\vec{P}_{и_3}$  направлен против  $\vec{a}_{S_3}$  и приложен в центре масс  $S_3$ ;  $\vec{P}_{и_4} = m_4 a_{B_4} = 4 \cdot 2,4 = 9,6$ , вектор  $\vec{P}_{и_4}$  направлен против  $\vec{a}_{S_4}$  и приложен в центре масс звена 4 в точке  $S_4$ ;  $\vec{P}_{и_5} = m_5 a_C = 150 \cdot 2,1 = 315 \text{ Н}$ , вектор  $\vec{P}_{и_5}$ , направлен против  $\vec{a}_C$  и приложен в центре масс звена 5 в точке  $C$ ;

- моменты пар сил инерции:

$$|M_{и_2}| = I_{S_2} \cdot \varepsilon_2 = 0,02 \cdot 7,83 = 0,157 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$|M_{и_3}| = I_{S_3} \cdot \varepsilon_3 = 0,3 \cdot 7,83 = 2,35 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$|M_{и_4}| = I_{S_4} \cdot \varepsilon_4 = 0,02 \cdot 9,17 = 0,18 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Моменты  $M_{и_i}$  направляются против соответствующих угловых ускорений  $\varepsilon_i$ .

Силами, которые меньше 2% от максимальной (это сила  $P_{пс} = 5000 \text{ Н}$ , то есть 2% от 5000 это 100 Н) – пренебрегаем. Это силы  $G_2$ ,  $G_4$ ,  $\vec{P}_{и_2}$ ,  $\vec{P}_{и_3}$ ,  $\vec{P}_{и_4}$ .

Величина всех сил и моментов сил, действующих на звенья механизма сведены в табл. 4.

Таблица 4 – Значения величин сил и моментов сил

$G_3$ , Н	$G_5$ , Н	$P_{и_5}$ , Н	$P_{пс}$ , Н	$M_{и_2}$ , Н·м	$M_{и_3}$ , Н·м	$M_{и_4}$ , Н·м
245	1470	315	5000	0,157	2,35	0,18

Направления всех сил и моментов пар сил инерции, а также точки их приложения показаны на листе (прил. Г).

### 3.2. Определение реакций в кинематических парах без учета сил трения

Силовой расчет выполняется методом кинетостатики, для чего на основании принципа д'Аламбера к силам, действующим на звенья механизма, добавляем силы инерции. Полученная система сил удовлетворяет условиям равновесия.

Силовой расчет начинаем с последней в порядке присоединения к начальному звену группы Ассура, то есть группы звеньев 4-5 (прил. Г).

Продолжение прил. Б

3.2.1. Силовой расчет группы 4-5 представлен на рис. 7. На кинематической схеме группы 4-5 покажем все действующие силы и моменты. Действие отброшенных звеньев заменим реакциями: Внешние реакции в шарнире  $B$  –  $R_{43}$  и в поступательной паре 5-0 –  $R_{50}$ ; внутренние реакции в шарнире  $C$ , который соединяет звенья 4 и 5:  $R_{45} = -R_{54}$ .

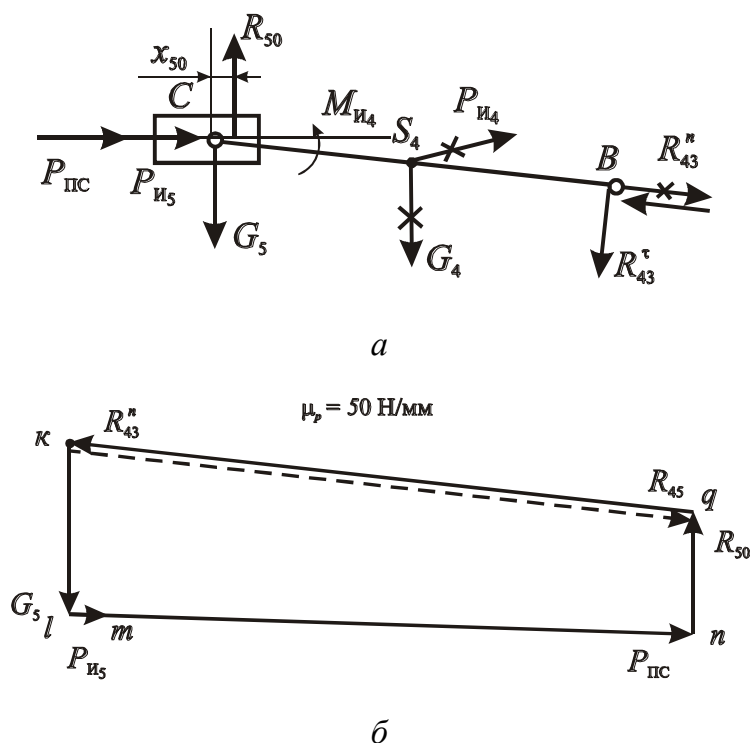


Рисунок 7 – Силовой расчет группы 4-5: а – группа Ассура 4-5; б – план сил группы 4-5

Разложим реакцию  $R_{43}$  на две составляющие: нормальную  $R_{43}^n$ , которая направлена по звену 4 и тангенциальную  $R_{43}^τ$ , которая перпендикулярна звену 4:  $R_{43}^τ \perp R_{43}^n$ . Направления векторов  $R_{43}^n$  и  $R_{43}^τ$  задаем произвольно. Если в результате расчетов получим величину со знаком «-», тогда вектор силы направляем в противоположную сторону.

Определяем:

– из равновесия сил, действующих на звено 4 в виде  $\sum m_C(\vec{F}_i) = 0$ , найдем реакцию  $R_{43}^τ$ ;

$$- R_{43}^τ \cdot l_{BC} + M_{и4} = 0; R_{43}^τ = \frac{M_{и4}}{l_{BC}} = \frac{0,18}{0,12} = 1,5 \text{ Н. } R_{43}^τ \text{ пренебрегаем, так}$$

как она меньше 100 Н.

Продолжение прил. Б

– из равновесия сил, приложенных к звеньям 4 и 5 в виде  $\sum \bar{F}_i = 0$ , находим  $R_{43}^n$  и  $R_{50}$ :  $\bar{R}_{43}^n + \bar{G}_5 + \bar{P}_{И5} + \bar{P}_{ПС} + \bar{R}_{50} = 0$ .

Выбираем масштаб плана сил  $\mu_p = 50$  Н/мм и на листе строим план сил (рис. 7, б): начало построения – точка  $\kappa$ ; отложим вектор  $(\overline{\kappa l}) = \frac{\bar{G}_5}{\mu_p} = \frac{1470}{50} = 29,4$

мм, затем векторы  $(\overline{lm}) = \frac{P_{И5}}{\mu_p} = \frac{315}{50} = 6,3$  мм,  $(\overline{mn}) = \frac{P_{ПС}}{\mu_p} = \frac{5000}{50} = 100$  мм. После

построения известных векторов из точки  $n$  проводим линию  $\perp$  направляющей  $\beta - \beta$ , то есть направление реакции  $R_{50}$ , а из точки  $\kappa$  – направление  $R_{43}^n$ , на пересечении этих двух направлений получим точку  $q$ . Из плана имеем:  $\bar{R}_{50} = (\overline{nq}) \cdot \mu_p = 22 \cdot 50 = 1100$  Н;  $R_{43}^n = (\overline{q\kappa}) \cdot \mu_p = 107 \cdot 50 = 5350$  Н.  $R_{43}^n$  на плане направлено противоположно заданному, поэтому меняем направление на обратное. Направление вектора суммарной реакции находим из плана сил, а ее величину считаем

$$R_{43} = \sqrt{(R_{43}^n)^2 + (R_{43}^r)^2} = R_{43}^n = 5350 \text{ Н};$$

– плечо приложения реакции  $R_{50}$  определим из равновесия сил звена 5 в виде  $\sum m_C(\bar{F}_i) = 0$   $x_{50} \cdot R_{50} = 0$ , откуда  $x_{50} = 0$ .  $R_{50}$  проходит через шарнир С;

– внутреннюю реакцию  $R_{45}$  определим из равновесия сил приложенных к звену 4 в виде  $\sum \bar{F}_i = 0$ :  $\bar{R}_{43}^n + \bar{R}_{45} = 0$ , откуда  $\bar{R}_{45} = -\bar{R}_{43}^n$ ;  $R_{45} = 5350$  Н. на рис. 7, б она показана пунктиром.

3.2.2. Силовой расчет группы 2-3 представлен на рис. 8. На листе изобразим в масштабе кинематическую схему группы Ассур 2-3 со всеми действующими силами и моментами, а также с реакцией  $R_{34} = -R_{43}$  в шарнире В, которая была определена в п. 2.3.2.1. Действие отброшенных звеньев заменим реакциями: внешними: в шарнире D –  $R_{30}$  и в шарнире А –  $R_{21}$ , а также внутренними –  $R_{23} = -R_{32}$  в поступательной паре 2-3.

Разложим реакцию  $R_{21}$  на две составляющие:  $R_{21}^r \parallel AD$  и  $R_{21}^n \perp AD$ , а реакцию  $R_{30}$  не раскладываем:

– рассмотрим равновесие сил, приложенных к звену 2 в виде  $\sum \Pi_{P_{\alpha-\alpha}}(\bar{F}_i) = 0$ , определим  $R_{21}^r$  так как силами  $G_2$  и  $P_{И2}$  пренебрегаем, то

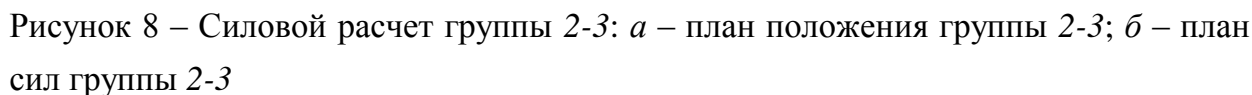


реакция  $R_{21}^\tau = 0$ ;

$$R_{21}^n = \frac{(G_3 h_{G_3} + R_{34} h_{R_{34}}) \cdot \mu_l + M_{H_2} + M_{H_3}}{(AD) \cdot \mu_l} =$$

$$= \frac{(245 \cdot 9 + 5350 \cdot 90) \cdot 0,004 + 0,157 + 2,35}{67 \cdot 0,004} = 7229 \text{ Н.}$$

– реакцию  $R_{30}$  в шарнире  $D$  определим из равновесия сил, приложенных к группе 2-3 в виде  $\sum \bar{F}_i = 0$ :  $\bar{R}_{21}^n + \bar{G}_3 + \bar{R}_{34} + \bar{R}_{30} = 0$ .



Продолжение прил. Б

Строим план сил в масштабе  $\mu_p = 50 \text{ Н/мм}$ . (рис. 8, б): начало построения – точка  $r$ ; отложим вектор  $(\overline{rs}) = \frac{R_{21}^n}{\mu_p} = \frac{7229}{50} = 144,5 \text{ мм}$ , затем вектор  $(\overline{st}) = \frac{G_3}{\mu_p} = \frac{245}{50} = 4,9 \text{ мм}$  и вектор  $(\overline{tp}) = \frac{R_{34}}{\mu_p} = \frac{5350}{50} = 107 \text{ мм}$ . Соединим точку  $p$  и  $r$  и получим вектор  $(\overline{pr})$ .

$$\overline{R}_{30} = (\overline{pr}) \cdot \mu_p = 36 \cdot 50 = 1800 \text{ Н.}$$

Внутреннюю реакцию  $R_{23}$  определим из равновесия сил звена 2 в виде  $\sum \overline{F}_i = 0$ :  $\overline{R}_{21} + \overline{R}_{23} = 0$ , откуда  $\overline{R}_{23} = -\overline{R}_{21}$ ;  $R_{23} = 7229 \text{ Н}$ .

Плечо положения  $x_{23}$  реакции  $R_{23}$  определим из равновесия сил, приложенных к звену 2, в виде  $\sum m_A(\overline{F}_i) = 0$ :  $x_{23} \cdot R_{23} - M_{И_2} = 0$ ,  
 $x_{23} = \frac{M_{И_2}}{R_{23}} = \frac{0,157}{7229} = 2,17 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$

### 3.2.3. Силовой расчет начального звена (звена 1)

Начальное звено 1 крепится на одном валу с зубчатым колесом 5 ( $z_5 = 22$ ,  $m = 5$ ) и получает движение от зубчатого колеса  $z_4 = 10$ . На рис. 9 показаны начальные окружности этих колес. Уравновешивающая сила  $P_{yp}$  направлена по линии зацепления так, что ее момент относительно точки  $O$  уравновешивает момент реакции  $R_{12}$ .

$P_{yp}$  определяется из условия равновесия сил, приложенных к начальному звену ( $\sum M_O(F_i) = 0$ ) (рис. 9, а):

$$(P_{yp} h_{P_{yp}} - R_{12} h_{R_{12}}) \mu_l = 0,$$

откуда

$$P_{yp} = \frac{R_{12} h_{R_{12}}}{h_{P_{yp}}} = \frac{7229 \cdot 35}{25} = 10120,6 \text{ Н.}$$

$$M_{yp} = P_{yp} h_{P_{yp}} \mu_l = 10120,6 \cdot 25 \cdot 0,002 = 506 \text{ Н м,}$$

где  $M_{yp}$  – уравновешивающий момент, действующий в приводе.

Реакция в шарнире  $O$ , определяется из условия:  $\sum \vec{F}_i = 0$ :  
 $\overline{R}_{12} + \overline{P}_{yp} + \overline{R}_{10} = 0$ .

Построением плана сил находим  $R_{10}$ :  $R_{10} = [R_{10}] \cdot \mu_p = 87 \cdot 100 = 8700 \text{ Н}$ ;  
 $[R_{10}] = 87 \text{ мм}$ .

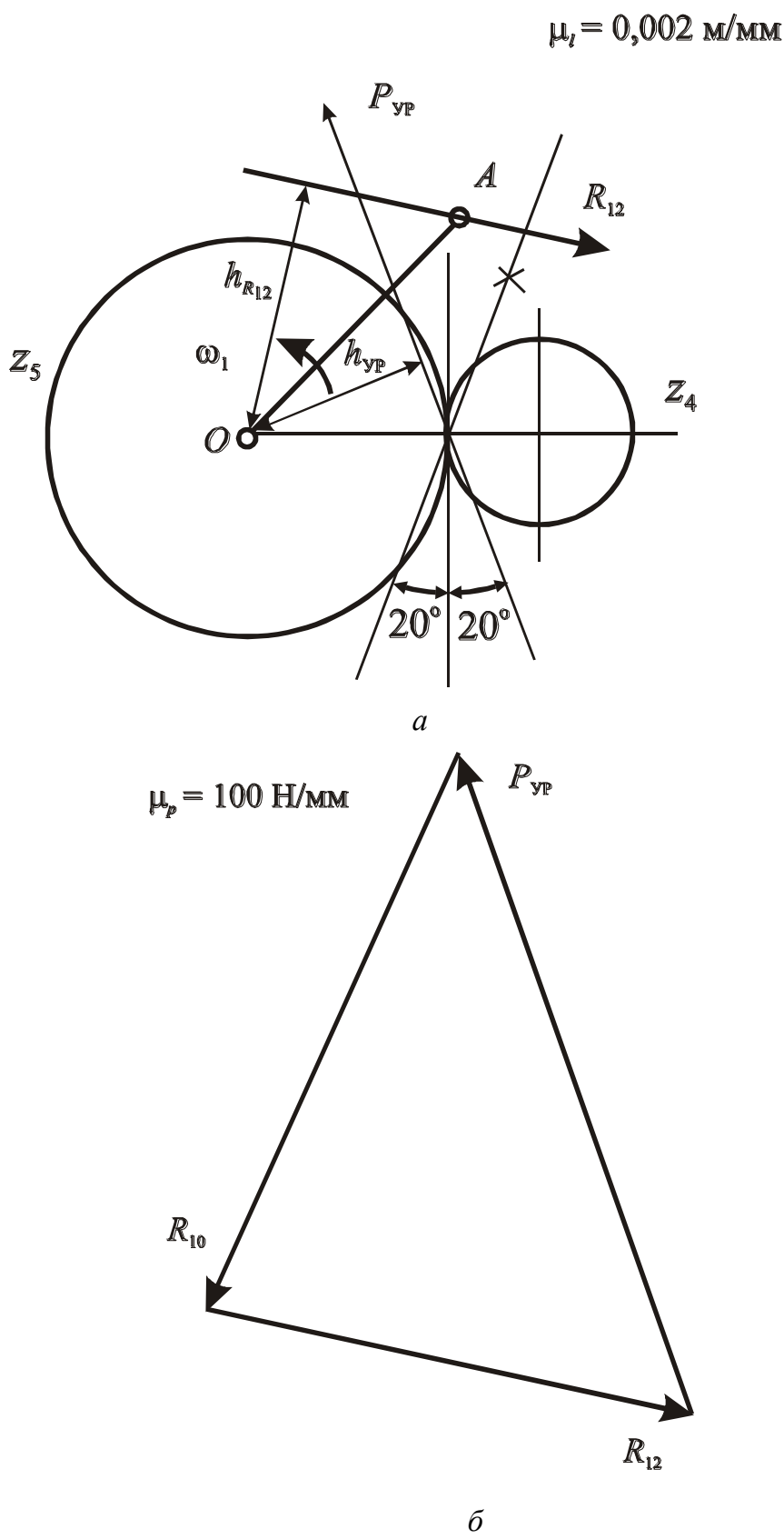


Рисунок 9 – Силовой расчет звена 1: *a* – звено 1; *b* – план сил звена 1.

Продолжение прил. Б

### 3.2.4. Проверка правильности выполненного силового расчета.

Для этого определим уравнивающий момент  $M_{yp}^*$ , действующий со стороны привода, используя общее уравнение динамики:

$$M_{yp}^* = \frac{1}{\omega_1} [G_5 V_C \cos(\hat{G_5 V_C}) + (P_{пс} + P_{и5}) \cdot V_C \cos(\hat{P_{пс} V_{B5}}) + M_{и4} \omega_4 - M_{и3} \omega_3 - \\ - M_{и2} \omega_2 + G_3 V_{S3} \cos(\hat{G_3 V_{S3}})] = -\frac{1}{8,37} [(5000 + 315) \cdot 0,76 + 0,18 \cdot 1,4 - \\ - 2,35 \cdot 2,01 - 0,157 \cdot 2,01 + 245 \cdot 0,36 \cos 104^\circ] = 485,7 \text{ Нм.}$$

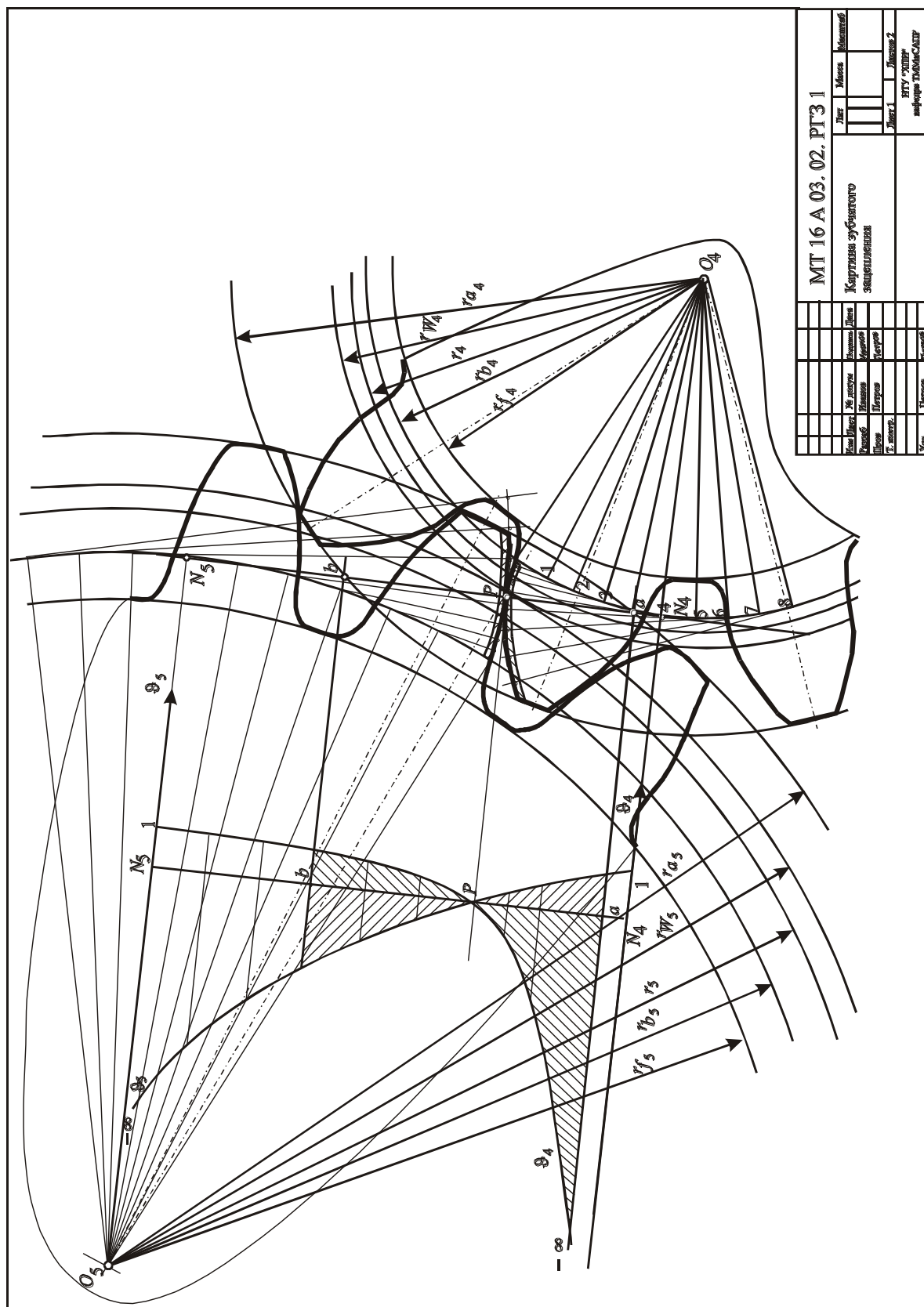
Здесь  $\left( \hat{P_i V_i} \right)$  – угол между вектором силы и вектором скорости точки приложения этой силы. Этот угол меряем на плане скоростей, перенося соответствующую силу в полюс плана скоростей.

Оценим погрешность силового расчета:

$$\Delta = \left| \frac{M_{yp}^* - M_{yp}}{M_{yp}^*} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{485,7 - 506}{485,7} \right| \cdot 100\% = 4,17\% .$$

$\Delta = 4,17\% < 5\%$  – следовательно, силовой расчет выполнен правильно.

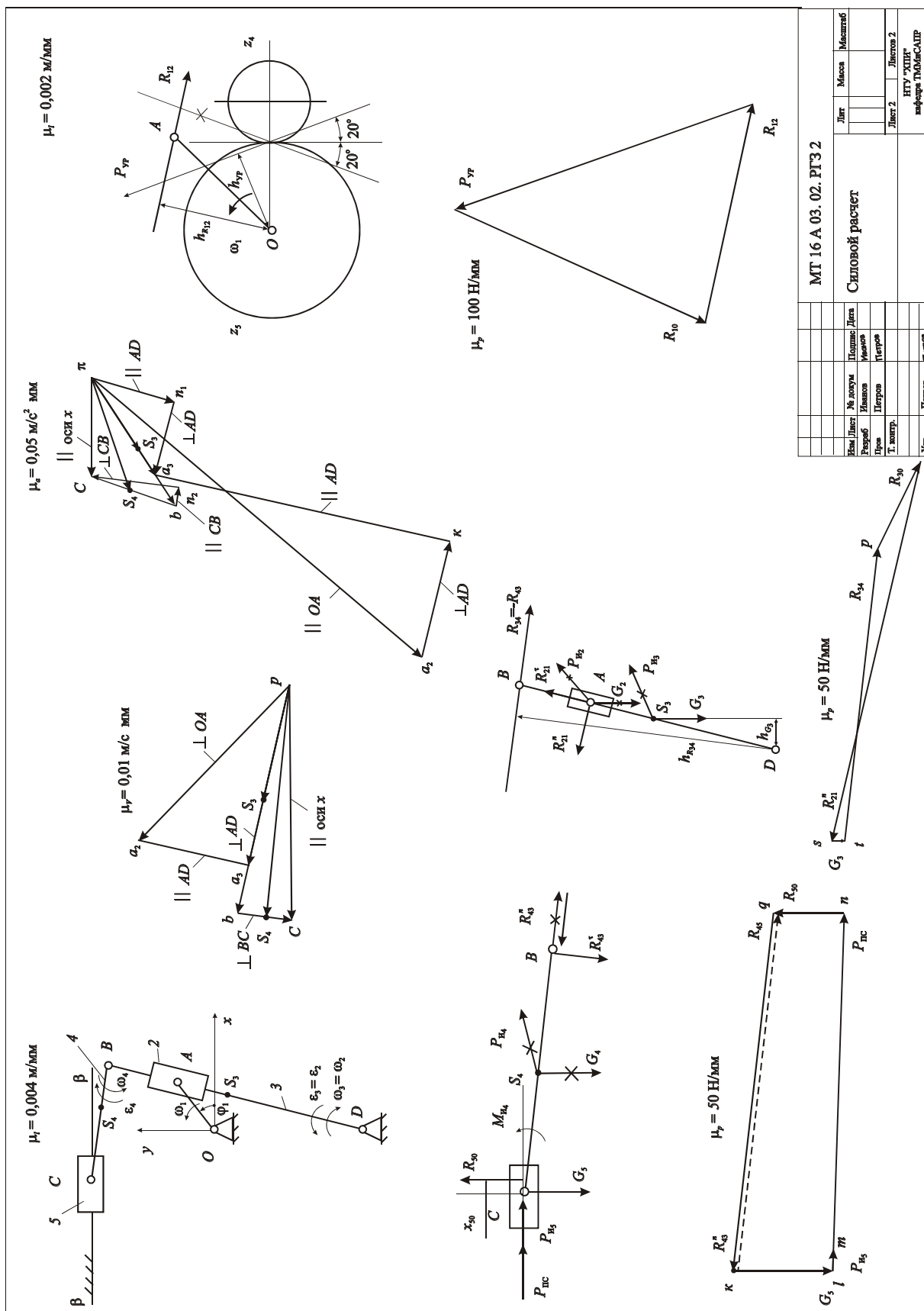
# Приложение В Картина зубчатого зацепления



МТ 16 А 03. 02. РГЗ 1									

## Приложение Г

### Силовой расчет механизма



Приложение Д

**Значения эвольвентной функции в радианах в зависимости  
от величины угла давления в градусах и минутах**

Минуты	Градусы					
	20	21	22	23	24	25
<b>0</b>	<b>0,01490 4</b>	<b>0,01734 5</b>	<b>0,02005 4</b>	<b>0,02304 9</b>	<b>0,02635 0</b>	<b>0,02997 5</b>
1	94 3	38 8	10 1	10 2	40 7	0,03003 9
2	98 2	43 1	14 9	15 4	46 5	10 2
3	0,01502 0	47 4	19 7	20 7	52 3	16 6
4	05 9	51 7	24 4	25 9	58 1	22 9
5	09 8	56 0	29 2	31 2	63 9	29 3
6	13 7	60 3	34 0	36 5	69 7	35 7
7	17 6	64 7	38 8	41 8	75 6	42 0
8	21 5	69 0	43 6	47 1	81 4	48 4
9	25 4	73 4	48 4	52 4	87 2	54 9
<b>10</b>	<b>0,01529 3</b>	<b>0,01777 7</b>	<b>0,02053 3</b>	<b>0,02357 7</b>	<b>0,02693 1</b>	<b>0,03061 3</b>
11	33 3	82 1	58 1	63 1	98 9	67 7
12	37 2	86 5	62 9	68 4	0,02704 8	74 1
13	41 1	90 8	67 8	73 8	10 7	80 6
14	45 1	95 2	72 6	79 1	16 6	87 0
15	49 0	99 6	77 5	84 5	22 5	93 5
16	53 0	0,01804 0	82 4	89 9	28 4	0,03100 0
17	57 0	08 4	87 3	95 2	34 3	06 5
18	60 9	12 9	92 1	0,02400 6	40 2	13 0
19	64 9	17 3	97 0	06 0	46 2	19 5
<b>20</b>	<b>0,01568 9</b>	<b>0,01821 7</b>	<b>0,021001 9</b>	<b>0,02411 4</b>	<b>0,02752 1</b>	<b>0,03126 0</b>
21	72 9	26 2	06 9	16 9	58 1	32 5
22	76 9	30 6	11 8	22 3	64 0	39 0
23	80 9	35 1	16 7	27 7	70 0	45 6
24	85 0	39 5	21 7	33 2	76 0	52 1
25	89 0	44 0	26 6	38 6	82 0	58 7
26	93 0	48 5	31 6	44 1	88 0	65 3
27	97 1	53 0	36 5	49 5	94 0	71 8
28	0,01601 1	57 5	41 5	55 0	0,02800 0	78 4
29	05 2	62 0	46 5	60 5	06 0	85 0

Минуты	Градусы					
	20	21	22	23	24	25
<b>30</b>	<b>0,01609 2</b>	<b>0,02466 0</b>	<b>0,02151 4</b>	<b>0,02466 0</b>	<b>0,02812 1</b>	<b>0,03191 7</b>
31	13 3	71 5	56 4	71 5	18 1	98 3
32	17 4	77 0	61 4	77 0	24 2	0,03204 9
33	21 5	82 5	66 5	82 5	30 2	11 6
34	25 5	88 1	71 5	88 1	36 3	18 2
35	29 6	93 6	76 5	93 6	42 4	24 9
36	33 7	99 2	81 5	99 2	48 5	31 5
37	37 9	0,02504 7	86 6	0,02504 7	54 6	38 2
38	42 0	10 3	91 6	10 3	60 7	44 9
39	46 1	15 9	96 7	15 9	66 8	51 6
<b>40</b>	<b>0,01650 2</b>	<b>0,02521 4</b>	<b>0,02201 8</b>	<b>0,02521 4</b>	<b>0,02872 9</b>	<b>0,03258 3</b>
41	54 4	27 0	06 8	27 0	79 1	65 1
42	58 5	32 6	11 9	32 6	85 2	71 8
43	62 7	38 2	17 0	38 2	91 4	78 5
44	66 9	43 9	22 1	43 9	97 6	85 3
45	71 0	49 5	27 2	49 5	0,02903 7	92 0
46	75 2	55 1	32 4	55 1	09 9	98 8
47	79 4	60 8	37 5	60 8	16 1	0,03305 6
48	83 6	66 4	42 6	66 4	22 3	12 4
49	87 8	72 1	47 8	72 1	28 5	19 2
<b>50</b>	<b>0,01692 0</b>	<b>0,02577 8</b>	<b>0,02252 9</b>	<b>0,02577 8</b>	<b>0,02934 8</b>	<b>0,03326 0</b>
51	96 2	83 4	58 1	83 4	41 0	32 8
52	0,01700 4	89 1	63 3	89 1	47 2	39 7
53	04 7	94 8	68 4	94 8	53 5	46 5
54	08 9	0,02600 5	73 6	0,02600 5	59 8	53 4
55	13 2	06 2	78 8	06 2	66 0	60 2
56	17 4	12 0	84 0	12 0	72 3	67 1
57	21 7	17 7	89 2	17 7	78 6	74 0
58	25 9	23 5	94 4	23 5	84 9	80 9
59	30 2	29 2	99 7	29 2	91 2	87 8
<b>60</b>	<b>0,01734 5</b>	<b>0,02635 0</b>	<b>0,02304 9</b>	<b>0,02635 0</b>	<b>0,02997 5</b>	<b>0,03394 7</b>



Минуты	Градусы				
	26	27	28	29	30
<b>0</b>	<b>0,03394 7</b>	<b>0,03828 7</b>	<b>0,04301 7</b>	<b>0,04816 4</b>	<b>0,05375 1</b>
1	0,03401 6	36 2	10 0	25 3	84 9
2	08 6	43 8	18 2	34 3	94 6
3	15 5	51 4	26 4	43 2	0,05404 3
4	22 5	59 0	34 7	52 2	14 0
5	29 4	66 6	43 0	61 2	23 8
6	36 4	74 2	51 3	70 2	33 6
7	43 4	81 8	59 6	79 2	43 3
8	50 4	89 4	67 9	88 3	53 1
9	57 4	97 1	76 2	97 3	62 9
<b>10</b>	<b>0,03464 4</b>	<b>0,03904 7</b>	<b>0,04384 5</b>	<b>0,04906 4</b>	<b>0,05472 8</b>
11	71 4	12 4	92 9	15 4	82 6
12	78 5	20 1	0,04401 2	24 5	92 4
13	85 5	27 8	09 6	33 6	0,05502 3
14	92 6	35 5	18 0	42 7	12 2
15	99 7	43 2	26 4	51 8	22 1
16	0,035067 0	50 9	34 8	60 9	32 0
17	13 8	58 6	43 2	70 1	41 9
18	20 9	66 4	51 6	79 2	51 8
19	28 0	74 1	60 1	88 4	61 7
<b>20</b>	<b>0,03535 2</b>	<b>0,03981 9</b>	<b>0,04468 5</b>	<b>0,04997 6</b>	<b>0,05571 7</b>
21	42 3	89 7	77 0	0,05006 8	81 7
22	49 4	97 4	85 5	16 0	91 6
23	56 6	0,04005 2	93 9	25 2	0,05601 6
24	63 7	13 1	0,04502 4	34 4	11 6
25	70 9	20 9	11 0	43 7	21 7
26	78 1	28 7	19 5	52 9	31 7
27	85 3	36 6	28 0	62 2	41 7
28	92 5	44 4	36 6	71 5	51 8
29	99 7	52 3	45 1	80 8	61 9

Минуты	Градусы				
	26	27	28	29	30
<b>30</b>	<b>0,03606 9</b>	<b>0,04060 2</b>	<b>0,04553 7</b>	<b>0,05090 1</b>	<b>0,05672 0</b>
31	14 2	68 0	62 3	99 4	82 1
32	21 4	75 9	70 9	0,05108 7	92 2
33	28 7	83 9	79 5	18 1	0,05702 3
34	35 9	91 8	88 1	27 4	12 4
35	43 5	99 7	96 7	36 8	22 6
36	50 5	0,04107 6	0,04605 4	46 2	32 8
37	57 8	15 6	14 0	55 6	42 9
38	65 1	23 6	22 7	65 0	53 1
39	72 4	31 6	31 3	74 4	63 3
<b>40</b>	<b>0,03679 8</b>	<b>0,04139 5</b>	<b>0,04640 0</b>	<b>0,05183 8</b>	<b>0,05773 6</b>
41	87 1	47 5	48 7	93 3	83 8
42	94 5	55 6	57 5	0,05202 7	94 0
43	0,03701 8	63 6	66 2	12 2	0,05854 3
44	09 2	71 6	74 9	21 7	14 6
45	16 6	79 7	83 7	31 2	24 9
46	24 0	87 7	92 4	40 7	35 2
47	31 4	95 8	0,04701 2	50 2	45 5
48	38 8	0,04203 9	10 0	59 7	55 8
49	46 2	12 0	18 8	69 3	66 2
<b>50</b>	<b>0,03753 7</b>	<b>0,04220 1</b>	<b>0,04727 6</b>	<b>0,05278 8</b>	<b>0,05876 5</b>
51	61 1	28 2	36 4	88 4	86 9
52	68 6	36 3	45 2	98 0	97 3
53	76 1	44 4	54 1	0,05307 6	0,05907 7
54	83 5	52 6	63 0	17 2	18 1
55	91 0	60 7	71 8	26 8	28 5
56	98 5	68 9	80 7	36 5	39 0
57	0,03806 0	77 1	89 6	46 1	49 4
58	13 6	85 3	98 5	55 8	59 9
59	21 1	93 5	0,04807 4	65 5	70 4
<b>60</b>	<b>0,03828 7</b>	<b>0,04301 7</b>	<b>0,04816 4</b>	<b>0,05375 1</b>	<b>0,05980 9</b>

Минуты	Градусы				
	31	32	33	34	35
<b>0</b>	<b>0,05980 9</b>	<b>0,06636 4</b>	<b>0,07344 9</b>	<b>0,08109 7</b>	<b>0,08934 2</b>
1	91 4	47 8	57 2	22 9	48 5
2	0,06001 9	59 1	69 5	36 2	62 8
3	12 4	70 5	81 8	49 4	77 1
4	23 0	81 9	94 1	62 7	91 4
5	33 5	93 4	0,07406 4	76 0	0,09005 8
6	44 1	0,06704 8	18 8	89 4	20 1
7	54 7	16 3	31 2	0,08202 7	34 5
8	65 3	27 7	43 5	16 1	48 9
9	75 9	39 2	55 9	29 4	63 3
<b>10</b>	<b>0,06086 6</b>	<b>0,06750 7</b>	<b>0,07468 4</b>	<b>0,08242 8</b>	<b>0,09077 7</b>
11	97 2	62 2	80 8	56 2	92 2
12	0,06107 9	73 8	93 2	69 7	0,09106 7
13	18 6	85 3	0,07505 7	83 1	21 1
14	29 3	96 9	18 2	96 6	35 6
15	40 0	0,06808 4	30 7	0,08310 0	50 2
16	50 7	20 0	43 2	23 5	64 7
17	61 4	31 6	55 7	37 1	79 3
18	72 1	43 2	68 3	50 6	93 8
19	82 9	54 9	80 8	64 1	0,09208 4
<b>20</b>	<b>0,06193 7</b>	<b>0,06866 5</b>	<b>0,07593 4</b>	<b>0,08377 7</b>	<b>0,09223 0</b>
21	0,06204 5	78 2	0,07606 0	91 3	37 7
22	15 3	89 9	18 6	0,08404 9	52 3
23	26 1	0,06901 6	31 2	18 5	67 0
24	36 9	13 3	43 9	32 1	81 6
25	47 8	25 0	56 5	45 7	69 3
26	58 6	36 7	69 2	59 4	0,09311 1
27	69 5	48 5	81 9	73 1	25 8
28	80 4	60 2	94 6	86 8	40 6
29	91 3	72 0	0,07707 3	0,08500 5	55 3

Минуты	Градусы				
	31	32	33	34	35
<b>30</b>	<b>0,06302 2</b>	<b>0,06983 8</b>	<b>0,07720 0</b>	<b>0,08514 2</b>	<b>0,09370 1</b>
31	13 1	95 6	32 8	28 0	84 9
32	24 1	0,07007 5	45 5	41 8	99 8
33	35 0	19 3	58 3	55 5	0,09414 6
34	46 0	31 2	71 1	69 3	29 5
35	57 0	43 0	83 9	83 2	44 3
36	68 0	54 9	96 8	97 0	59 2
37	79 0	66 8	0,07809 6	0,08610 8	74 2
38	90 1	78 7	22 5	24 7	89 1
39	0,06401 1	90 7	35 4	38 6	0,09504 1
<b>40</b>	<b>0,06412 2</b>	<b>0,07102 6</b>	<b>0,07848 3</b>	<b>0,08652 5</b>	<b>0,09519 0</b>
41	23 2	14 6	61 2	66 4	34 0
42	34 3	26 6	74 1	80 4	49 0
43	45 4	38 6	87 1	94 3	64 1
44	56 5	50 6	0,07900 0	0,08708 3	79 1
45	67 7	62 6	13 0	22 3	94 2
46	78 8	74 7	26 0	36 3	0,09609 3
47	90 0	86 7	39 0	50 3	24 4
48	0,06501 2	98 8	52 0	64 4	39 5
49	12 4	0,07210 9	65 1	78 4	54 6
<b>50</b>	<b>0,06523 6</b>	<b>0,07223 0</b>	<b>0,07978 1</b>	<b>0,08792 5</b>	<b>0,09669 8</b>
51	34 8	35 1	91 2	0,08806 6	85 0
52	46 0	47 3	0,08004 3	20 7	0,09700 2
53	57 3	59 4	17 4	34 8	15 4
54	68 5	71 6	30 6	49 0	30 6
55	79 8	83 8	43 7	63 1	45 9
56	91 1	96 0	56 9	77 3	61 1
57	0,06602 4	0,07308 2	70 0	91 5	76 4
58	13 7	20 4	83 2	0,08905 7	91 7
59	25 0	32 6	96 4	20 0	0,09807 1
<b>60</b>	<b>0,06636 4</b>	<b>0,07344 9</b>	<b>0,08109 7</b>	<b>0,08934 2</b>	<b>0,09822 4</b>

Минуты	Градусы				
	36	37	38	39	40
<b>0</b>	<b>0,09822</b>	<b>0,10778</b>	<b>0,11806</b>	<b>0,12911</b>	<b>0,14097</b>
1	838	795	824	930	117
2	853	811	842	949	138
3	869	828	859	968	158
4	884	844	877	987	179
5	899	861	895	0,13006	200
6	915	878	913	025	220
7	930	894	931	045	241
8	946	911	949	064	261
9	961	928	967	083	282
<b>10</b>	<b>0,09977</b>	<b>0,10944</b>	<b>0,11985</b>	<b>0,13102</b>	<b>0,014303</b>
11	992	961	0,12003	122	324
12	0,10008	978	021	141	344
13	024	995	039	160	365
14	039	0,11011	057	180	386
15	055	028	075	199	407
16	070	045	093	219	428
17	086	062	111	238	448
18	102	079	129	258	469
19	118	096	147	277	490
<b>20</b>	<b>0,10113</b>	<b>0,11113</b>	<b>0,12165</b>	<b>0,13297</b>	<b>0,14511</b>
21	149	130	184	316	532
22	165	146	202	336	553
23	181	163	220	355	574
24	196	180	238	375	595
25	212	197	257	395	616
26	228	215	275	414	638
27	244	232	293	434	659
28	260	249	312	454	680
29	276	266	330	473	701

Минуты	Градусы				
	36	37	38	39	40
<b>30</b>	<b>0,10292</b>	<b>0,11283</b>	<b>0,12348</b>	<b>0,13493</b>	<b>0,14722</b>
31	308	300	367	513	743
32	323	317	385	533	765
33	339	334	404	553	786
34	355	352	422	572	807
35	371	369	441	592	829
36	388	386	459	612	850
37	404	403	478	632	871
38	420	421	496	652	893
39	436	438	515	672	914
<b>40</b>	<b>0,10452</b>	<b>0,11455</b>	<b>0,12534</b>	<b>0,13692</b>	<b>0,14936</b>
41	468	473	552	712	957
42	484	490	571	732	979
43	500	507	590	752	0,15000
44	516	525	608	772	022
45	533	542	627	792	043
46	549	560	646	812	065
47	565	577	664	833	087
48	581	595	683	853	108
49	598	612	702	873	130
<b>50</b>	<b>0,10614</b>	<b>0,11630</b>	<b>0,12721</b>	<b>0,13893</b>	<b>0,15152</b>
51	630	647	740	913	173
52	647	665	759	934	195
53	663	682	778	954	217
54	679	700	797	974	239
55	696	718	815	995	261
56	712	735	834	0,14015	282
57	729	753	853	035	304
58	745	771	872	056	326
59	762	788	891	076	348
<b>60</b>	<b>0,10778</b>	<b>0,11806</b>	<b>0,12911</b>	<b>0,14097</b>	<b>0,15370</b>

## СОДЕРЖАНИЕ

Вступление .....	4
1. РГЗ №1. Синтез зубчатой передачи.....	4
2. РГЗ №2. Кинетостатическое исследование главного механизма.....	6
3. Оформление пояснительной записки и чертежей .....	8
Список литературы .....	9
Приложение А. Задания на РГЗ №1 и РГЗ №2.....	10
Приложение Б. Пример выполнения РГЗ №1 и РГЗ №2.....	19
Приложение В. Картина зубчатого зацепления .....	38
Приложение Г. Силовой расчет механизма .....	39
Приложение Д. Значения эвольвентной функции в радианах в зависимости от величины угла давления в градусах и минутах.....	40

Навчальне видання

**Теорія механізмів і машин  
Розрахунково-графічні завдання  
та методичні вказівки до їх виконання**  
для студентів машинобудівних спеціальностей

Російською мовою

Укладачі: ТКАЧУК Микола Анатолійович  
САФОНОВА Зінаїда Семенівна  
ЗАРУБІНА Алла Олександрівна  
СЕРИКОВ Володимир Іванович

Відповідальний за випуск М. А. Ткачук  
До видання роботу рекомендував В. К. Бєлов

В авторській редакції  
Комп'ютерна верстка І. Я. Храмцова

План 2008 р., п. 132

Підп. до друку	Формат 60x84 1/16.	Папір друк. №2
Друк – ризографія.	Гарнітура Times.	Ум. друк. арк. 1,8.
Обл. – вид. арк 2,4.	Наклад 50 прим.	Зам. № Ціна договірна

---

Видавничий центр НТУ „ХПІ”, 61002 Харків, вул. Фрунзе, 21  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2000 р.

---

Друкарня НТУ „ХПІ”, 61002 Харків, вул. Фрунзе, 21